

УДК 531.57

Б.В. БОШЕНЯТОВ\*\*\*, А.С. ДЬЯЧКОВСКИЙ\*, А.Н. ИЩЕНКО\*, В.З. КАСИМОВ\*,  
Р.Ю. МОНАХОВ\*\*, И.М. ТЫРЫШКИН\*

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ УСКОРЕНИЯ ТЕЛА В ЗАТОПЛЕННОМ ЖИДКОСТЬЮ КАНАЛЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ<sup>1</sup>

Путем математического моделирования внутрибаллистических процессов в пороховой камере и в затопленном пространстве внутри и за срезом канала баллистической установки исследованы особенности ускорения тела. Показана возможность повышения скорости тела на срезе канала при уменьшении длины канала.

**Ключевые слова:** пороховая камера, затопленный канал, баллистическая установка, ускорение тела, математическое моделирование.

Для математического моделирования внутрибаллистических процессов в [1] разработана физико-математическая модель и численная методика расчета основных процессов в баллистической установке (БУ). Она основана на модели квазиодномерного движения по осесимметричному каналу несущей газовой фазы и частиц различной природы (пороховые, конденсированные продукты сгорания, продукты абляции стенки канала). На левой границе расчетной области на дне канала БУ ставится граничное условие непротекания. В качестве граничного условия на правой границе также используется условие непротекания. При этом наличие в канале перед метаемом телом (МТ) жидкости может учитываться различным способом.

Если предполагать жидкость несжимаемой, то в качестве первого приближения наличие жидкости в канале можно учесть посредством добавления к массе МТ в каждый момент времени присоединенной массы, равной массе жидкости, расположенной между правым торцом МТ и сечением среза канала. В этом случае соответствующее уравнение движения МТ имеет вид

$$\left[ m_{\text{MT}} + (x_{\text{CP}} - x_{\text{MTP}}) S \rho_{\text{ж}} \right] \frac{d^2 x_{\text{MTЛ}}}{dt^2} = S \left[ p_{\text{MTЛ}} - (p_{\text{MTP}} + p_{\text{CP}}(t)) \right], \quad (1)$$

где  $m_{\text{MT}}$  – масса МТ;  $x_{\text{CP}}$  – координата среза канала;  $x_{\text{MTP}}$  – координата правого торца МТ;  $x_{\text{MTЛ}}$  – координата левого торца МТ;  $S$  – площадь поперечного сечения канала;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости;  $p_{\text{MTЛ}}$ ,  $p_{\text{MTP}}$  – давление слева и справа от МТ соответственно;  $p_{\text{CP}}(t)$  – зависимость от времени давления в сечении среза, соответствующая расчетной глубине.

Уравнение (1) является граничным условием в случае несжимаемой жидкости. При этом ускорению МТ «противостоит» вся масса жидкости, заполняющая канал в момент времени  $t$ . Очевидно, что такая постановка дает оценкой сверху влияния жидкости перед МТ на процесс его ускорения в канале. Величина  $p_{\text{CP}}(t)$  полагается постоянной, равной гидростатическому давлению на соответствующей расчетной глубине. То есть здесь пренебрегается отличием от нуля скорости жидкости, истекающей из канала в затопленное пространство.

Для учета сжимаемости движение жидкости внутри канала перед МТ и в затопленном пространстве за срезом канала рассчитывается на основе уравнений Навье – Стокса в осесимметричной постановке с помощью пакета FLUENT [2]. Он позволяет рассчитывать ламинарные, турбулентные, кавитационные течения как сжимаемых, так и несжимаемых жидкостей, различные режимы теплопереноса, теплообмена, теплопроводности, химические реакции, многофазные потоки и другие явления. Возможность использовать модели динамических сеток существенно расширяют область применения FLUENT.

В связи с большими градиентами скоростей для моделирования движения МТ в затопленном канале при помощи пакета FLUENT использовалась модель двухфазной среды (газ – пар) совместно с моделью кавитации, а также модуль динамических сеток.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках госзадания № 2014/223 (код проекта 1362).

При этом расчетная область имеет вид, показанный на рис. 1. Здесь подобласти расчетной сетки, имеющие более темное изображение, соответствуют более мелкой сетке. В нижней левой части рисунка показана расчетная подобласть, соответствующая каналу. При построении сетки в ней используется модуль динамических сеток. Положение правой и верхней границы выбирается таким образом, чтобы возмущение от движущегося тела не достигало границ, при этом давление на границах равно гидростатическому давлению на соответствующей расчетной глубине (считается, что ось канала горизонтальна). Поскольку расчеты внутрибаллистических процессов в БУ и движения жидкости перед телом производятся слоями по времени, то взаимовлияние рассматриваемых процессов осуществляется на уровне перехода с нижнего расчетного слоя на верхний. Из пакета FLUENT передается величина текущего необходимого шага по времени и среднее по сечению давление жидкости на правый торец снаряда (в обозначениях уравнения (1) ему соответствует комплекс  $p_{\text{МТП}} + p_{\text{СР}}(t)$ ). Численная методика внутрибаллистических расчетов производит с данным давлением жидкости нужное количество шагов по времени с учетом собственного критерия устойчивости и возвращает значение средней скорости правого торца тела  $\bar{V}_{\text{МТП}}$  из решения уравнения (1) в пакет FLUENT. Предполагая, что МТ не деформируется, данная величина, очевидно, равна  $\bar{V}_{\text{МТП}} = \frac{dx_{\text{МТП}}}{dt}$ .

Технически это производится путем использования UDF-функций пакета FLUENT и реализацией численной методики внутрибаллистических расчетов в виде динамически линкуемой библиотеки и экспортируемой функции, вызываемой в UDF-функции. Таким образом, расчеты внутрибаллистических процессов в БУ и движения жидкости перед МТ производятся в сопряженной постановке.

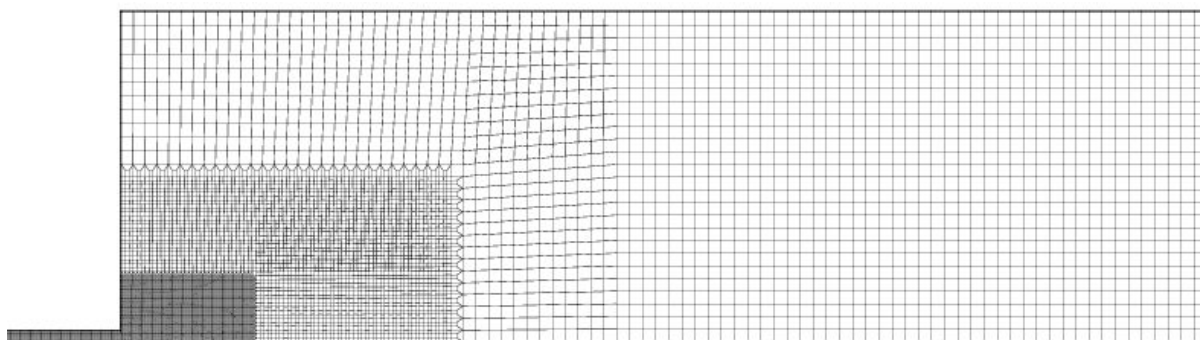


Рис. 1. Расчетная область при использовании пакета FLUENT

Результаты проведенных расчетов представлены в безразмерном виде. В качестве характерных параметров выбраны: диаметр канала  $d_0$ , плотность жидкости  $\rho_{\text{ж}}$ , скорость звука в жидкости  $c_{\text{ж}}$ . Очевидно, что величины, имеющие размерность скорости, в безразмерном виде будут отнесены к  $c_{\text{ж}}$ , величины, имеющие размерность давления, – к  $\rho_{\text{ж}} c_{\text{ж}}^2$ , величины, имеющие размерность длины, – к  $d_0$ , величины, имеющие размерность массы, – к  $\rho_{\text{ж}} d_0^3$ , а величины, имеющие размерность времени, – к  $d_0/c_{\text{ж}}$ .

На рис. 2 представлено сравнение результатов расчетов для канала длиной 170 и массой МТ, равной 9, полученных по разным моделям учета жидкости в канале. При этом параметры заряжения порохового заряда были выбраны такими, чтобы скорость МТ на срезе канала составляла величину порядка 0.33 для модели несжимаемой жидкости, это достигается при плотности заряжения 0.47. Расчетные зависимости от времени давления пороховых газов на дно МТ и скорости МТ показаны на рисунке сплошными кривыми. Здесь же штриховыми кривыми показаны аналогичные зависимости, полученные в сопряженной постановке, а точками – зависимость давления жидкости от времени на переднем торце МТ. Из расчетных данных, приведенных на рис. 2, видно, что имеет место как качественное различие динамики поведения давления и скорости МТ  $V$ , полученных в расчетах в разной постановке, так и количественное отличие конечной скорости МТ и максимального давления  $P_{\text{max}}$  в пороховой камере. Был также проведен соответствующий расчет в сопряженной постановке с повышенной до 0.61 плотностью заряжения порохового заряда, результаты приведены на рис. 3.

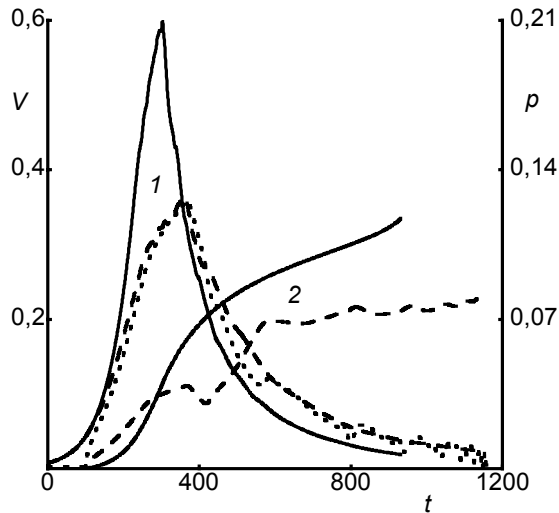


Рис. 2. Сравнение результатов расчетов, полученных по разным моделям учета жидкости в канале для плотности заряжения порохового заряда 0.47

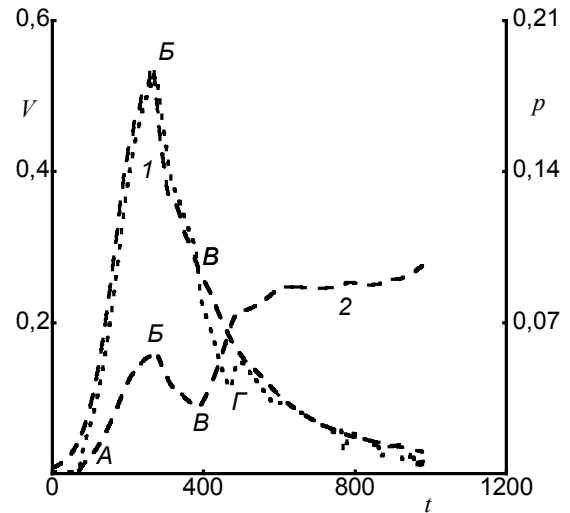


Рис. 3. Результаты расчетов, полученных для учета жидкости в канале в сопряженной постановке, для плотности заряжения порохового заряда 0.61

Из сравнения приведенных результатов расчетов видно, что повышение плотности заряжения приводит к повышению  $P_{max}$  и соответственно к росту  $V$ . Вместе с тем становится более выраженным немонотонный характер набора скорости МТ, который требует дополнительного объяснения, поскольку является нетипичным для внутренней баллистики БУ при выстреле в газовой атмосфере и в вакууме. Для этого на рис. 4 и 5 представлены соответственно распределения давления и скорости жидкости по оси канала в различные моменты времени. Безразмерные значения времени надписаны в разрывах линий. Сечение  $x = 0$  соответствует срезу канала.

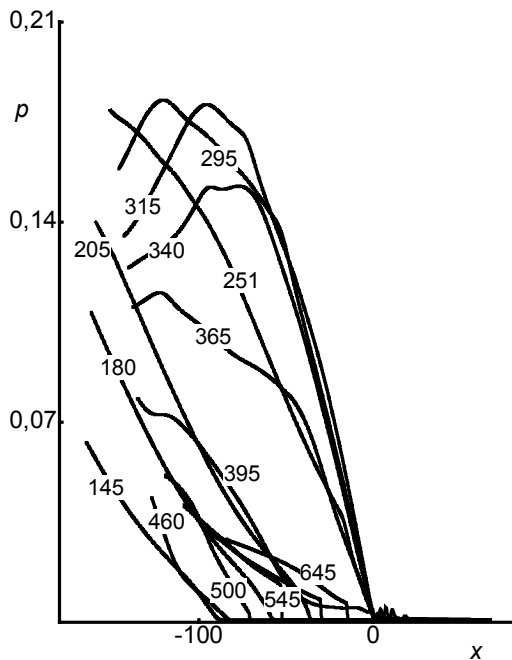


Рис. 4. Распределения давления жидкости по оси канала в различные моменты времени

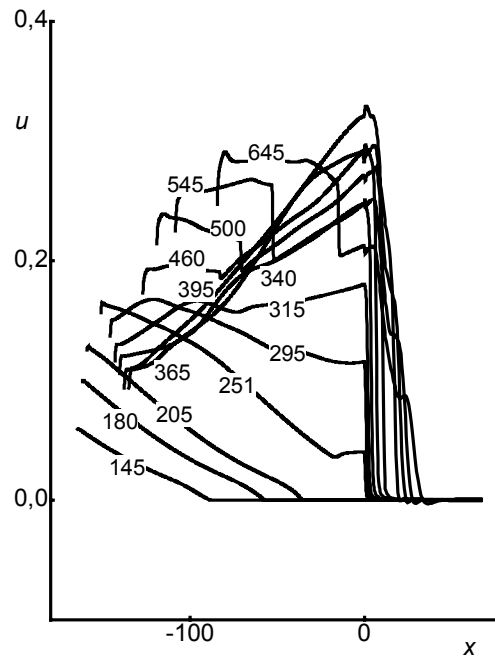


Рис. 5. Распределения скорости жидкости по оси канала в различные моменты времени

Проведем анализ представленных на рис. 4-5 результатов. В начальный момент начинает гореть пороховой заряд, после этого в пороховой камере поднимается давление. По достижении заданного давления на задний торец МТ  $p_{\phi}$  МТ начинает движение, при этом по жидкости распространяется волна сжатия (точка А на рис. 3). Скорость МТ растет в результате имеющейся положительной разности давления пороховых газов и жидкости на заднем и переднем торце МТ. Через

некоторый промежуток времени после окончания горения порохового заряда давление в сжатом слое жидкости становится большим, чем в пороховой камере (точка *B*) и начинается фаза торможения МТ, которая продолжается до прихода на МТ волны разрежения, порожденной отражением волны сжатия от затопленного пространства за срезом канала (точка *B*). В этот момент давление в пороховой камере снова становится выше давления жидкости на переднем торце МТ и его скорость начинает расти. Описанный процесс повторяется неоднократно и со все большей частотой вследствие уменьшения расстояния между передним торцом МТ и срезом канала.

Таким образом, представляется вероятным следующий критерий монотонности набора скорости МТ: время сгорания порохового заряда не меньше удвоенного времени прохождения волной сжатия или разрежения в жидкости расстояния, равного длине канала. Для проверки этого критерия был проведен расчет с параметрами, соответствующими приведенным на рис. 3, но с длиной канала равной 85. Результаты расчетов представлены на рис. 6 и подтверждают сделанное предположение. Отметим также, что конечная скорость МТ почти в 1.5 раза выше, чем при длине канала 170.

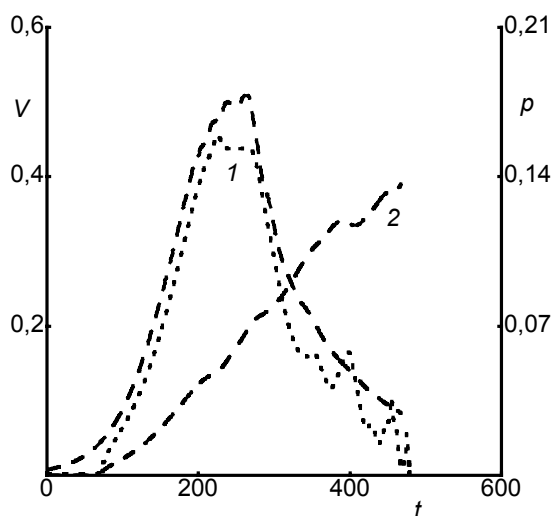


Рис. 6. Результаты расчетов, полученных для учета жидкости в канале в сопряженной постановке, плотности заряжания порохового заряда 0.61 и длиной канала 85

Таким образом, путем расчетов внутрибаллистических процессов в БУ и движения жидкости перед МТ в сопряженной постановке исследованы особенности разгона МТ в затопленном жидкостью канале и показана возможность повышения скорости МТ на срезе канала при уменьшении длины канала. Данный результат является нетипичным для внутренней баллистики БУ при выстреле в газовой атмосфере и в вакууме. Предложенная методика позволяет проводить оптимизацию длины затопленного ствола баллистической установки в условиях подводной стрельбы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 256 с.
2. ANSYS Inc., 2011, ANSYS FLUENT Release 14.0 User Manual, ANSYS Inc.

\*НИИ прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета, г. Томск, Россия Поступила в редакцию 12.09.14.

\*\*Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

\*\*\*Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

E-mail: ksm@niipmm.tsu.ru

Бошнятов Борис Владимирович, д.ф.-м.н., введущ. науч. сотр.;

Дьячковский Алексей Сергеевич, инженер-исследователь;

Ищенко Александр Николаевич, д.ф.-м.н., зам. директора;

Касимов Владимир Зинатович, д.ф.-м.н., ст. науч. сотр., зав. лабораторией;

Монахов Роман Юрьевич, к.т.н., введущ. науч. сотр.;

Тырышкин Илья Михайлович, инженер-исследователь.

*B.V. BOSHENAYTOV, A.S. DIACHKOVSKY, A.N. ISHCENKO, V.Z. KASIMOV, R.YU. MONAHOV, I.M. TYRYSHKIN*

## **THE STUDY FEATURES IN THE ACCELERATION OF A BODY SUBMERGED LIQUID CHANNEL BALLISTIC INSTALLATION**

Through mathematical modeling intraballistic processes in the powder chamber and in the flooded area in and cut ballistic channel installation features investigated acceleration of the body. The possibility of increasing the speed of the body on the cut channel decreases the channel length.

**Keywords:** *powder chamber, flooded channel, ballistic installation, acceleration of the body, mathematical modeling.*

### REFERENCES

1. Khomenko Y.P., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z. *Matematicheskoe modelirovanie vnutriballisticheskikh protsessov v stvolnikh sistemakh* [Mathematical modeling of interior ballistic processes in barrel system]. Novosibirsk, Publishing House of SB RAS, 1999, 256 p.
2. ANSYS Inc., 2011, ANSYS FLUENT Release 14.0 User Manual, ANSYS Inc.