

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОПУШКИ ДЛЯ  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ  
ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРЕДМЕТОВ**

*А.Н.Семко\**, д-р техн. наук, профессор;

*В.В. Решетняк\*\**;

*М.В. Дубровкина\*\*\**, канд. техн. наук;

*В.А. Бизвава\*\*\**,

\* *Донецкий национальный университет, г. Донецк, Украина;*

\*\**Владимирский государственный университет, г. Владимир, Россия;*

\*\*\**Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт  
«Искра», г. Луганск, Украина*

*Выполнена оптимизация параметров внутренней баллистики пороховой гидропушки с целью снижения максимального давления в стволе гидродинамического устройства (ГДУ) при сохранении максимальной скорости истечения струи для обеспечения эффективного бездетонационного обезвреживания ВОП и снижения массогабаритных параметров ГДУ.*

**Ключевые слова:** *гидродинамическое устройство, взрывоопасный предмет, пороховая гидропушка, эффективность обезвреживания, гуманитарное разминирование.*

*Виконано оптимізацію параметрів внутрішньої балістики порохової гідрогармати з метою зниження максимального тиску в стволі гідродинамічного пристрою (ГДП) при збереженні максимальної швидкості витікання струменя для забезпечення ефективного безвибухового знешкодження ВВП і зниження масогабаритних параметрів ГДП.*

**Ключові слова:** *гідродинамічний пристрій, вибухонебезпечний предмет, порохова гідрогармата, ефективність знешкодження, гуманітарне розмінування.*

**ВВЕДЕНИЕ**

В современном мире очень остро стоит проблема минной опасности, которая вызвана и наличием незорвавшихся мин и боеприпасов, оставшихся после многочисленных войн последней сотни лет, и применением минного и взрывоопасного оружия при локальных конфликтах и террористических актах [1].

Для устранения кризиса, вызванного минной опасностью, международное сообщество вынуждено было создать новый самостоятельный вид разминирования – «Гуманитарное разминирование» (ГР), которое является основной частью международной противоминной деятельности и выполняется под эгидой ООН. ГР осуществляется в соответствии с международными стандартами International Mine Action Standards – IMAS [2] и является более сложной и трудоемкой задачей по сравнению с военным разминированием, так как требует стопроцентной очистки территорий от взрывоопасных предметов (ВОП), максимального снижения уровня риска для проводящих его специалистов и населения, минимального воздействия на экосистему и т.д. ГР представляет собой комплекс операций по очистке территорий от ВОП, основными из которых являются операции по обезвреживанию или снижению опасности ВОП.

На сегодняшний день разработано множество методов, технологий и устройств для обезвреживания ВОП как для задач военного, так и гуманитарного разминирования [3-6]. Однако остается еще и множество нерешенных проблем. Одной из таких проблем является проблема снижения опасности обезвреживания ВОП, оснащенных устройствами неизвлекаемости, или ВОП с поврежденными корпусами, состояние

механизмов взрывателей которых неизвестно, и которые установлены на важных объектах, в местах возможного скопления людей, в местах, в которых несанкционированный взрыв может повлечь за собой экологическую катастрофу. Как правило, такие ВОП нельзя уничтожить на месте методом подрыва и опасно транспортировать на полигоны для уничтожения. Наиболее типичными ВОП такого класса являются диверсионные мины, имеющие несколько степеней защиты от обезвреживания, террористические заряды, конструкция которых, как правило, неизвестна, и невзорвавшиеся боеприпасы, подвергнувшиеся значительным механическим, тепловым или другим воздействиям.

Одним из перспективных методов обезвреживания таких ВОП является гидродинамический метод. Под гидродинамическим методом обезвреживания ВОП понимают его разрушение с помощью импульсной струи жидкости. При этом струя пробивает и разрушает корпус ВОП, дробит монолит ВВ и разбрасывает отдельные его фрагменты за время, меньшее времени срабатывания взрывателей на расстоянии, которое больше расстояния возможности индукционной передачи детонации между фрагментами ВВ [7].

### АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сам по себе метод гидродинамического обезвреживания известен достаточно давно и с успехом применяется полицейскими подразделениями для обезвреживания террористических зарядов относительно небольшой массы в непрочных оболочках. Его перспективность для целей гуманитарного разминирования достаточно подробно рассмотрена в [6, 8-10].

Реализация метода гидродинамического обезвреживания ВОП осуществляется с помощью гидродинамических устройств (ГДУ) с пороховой энергетикой (так называемых «гидропушек»), в которых столб жидкости разгоняется с помощью взрыва порохового заряда и при истечении из ствола совершает работу по разрушению ВОП. Такие ГДУ серийно выпускаются и успешно эксплуатируются во многих странах [11-14]. Однако проведенные авторами экспериментальные исследования по оценке возможности применения таких ГДУ для целей гуманитарного разминирования показали их относительно низкую разрушающую способность и, соответственно, очень низкую эффективность при обезвреживании ВОП, имеющих массу ВВ более 1 – 2 кг и оболочку из стали более 1-2 мм. Струя, создаваемая этими устройствами, имеет скорость, не превышающую 300-400 м/с, что недостаточно для обезвреживания ВОП в прочных металлических корпусах. Такое же мнение высказано в работе [14], в которой такие устройства рекомендуется применять для обезвреживания взрывных устройств без оболочек, или устройств, имеющих непрочные (пластиковые, деревянные, бумажные и т.п.) оболочки.

Для обезвреживания одиночных взрывных устройств, оснащенных элементами неизвлекаемости, или с поврежденными корпусами, состояние механизмов взрывателей которых неизвестно, и которые установлены на важных объектах, в местах возможного скопления людей, в местах, в которых несанкционированный взрыв может повлечь за собой экологическую катастрофу, обезвреживание которых традиционными методами невозможно по соображениям безопасности, научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом «Искра» (НИПКИ «Искра» г. Луганск), совместно с Донецким национальным университетом (ДонНУ) был создан параметрический ряд ГДУ. Применение созданных ГДУ позволяет обезвредить взрывные устройства, в том числе имеющие прочные стальные корпуса, массу ВВ более 25 кг, установленных как на воздухе, так и под водой на глубинах

до 40 м или под слоем грунта толщиной до 200 мм [15, 16]. Отличие этих ГДУ заключается в том, что их стволы оснащены специальными профилированными соплами и жидкость под действием давления пороховых газов не свободно истекает из ствола, как это происходит в традиционных ГДУ, а под воздействием ударно-волновых процессов, возникающих в ней при втекании в сопло, формируется на выходе в «ультраструю», имеющую скорость головы, превышающую 1000 м/с.

Создание данных ГДУ потребовало решения многих технических противоречий. К числу технических противоречий можно отнести и задачу оптимизации энергетических параметров струи и массогабаритных характеристик ГДУ.

Технические противоречия при создании ГДУ, предназначенного для обезвреживания ВОП, заключаются в том, что, с одной стороны, для обеспечения разрушения наполненной оболочковой конструкции, какими, по сути, являются ВОП, необходима достаточная скорость головы струи для пробивания прочной оболочки и достаточные длина струи и ее импульс для быстрой дефрагментации монолита ВВ, а с другой стороны, тактика применения таких устройств требует минимизации их массогабаритных параметров.

При проектировании ствольной артиллерии и стрелкового оружия длину разгонной части ствола обычно принимают исходя из расчета 40 – 50 калибров, а для зенитной артиллерии даже 80 калибров ствола, что дает возможность, кроме повышения точности стрельбы, в полной мере использовать энергию пороха при относительно небольших максимальных давлениях. Если следовать такому подходу, то при внутреннем диаметре ствола ГДУ 40 мм его разгонная часть должна составлять не менее 1600 мм. Кроме того, плотность жидкости почти в 8 раз меньше плотности металлических снарядов, поэтому для ее размещения в стволе необходимо достаточно много места и на организацию разгонной части ствола остается всего несколько десятков миллиметров. Рассматриваемое противоречие также связано с неоднозначностью выбора типа пороха. Если для проектирования метательных зарядов применять быстрогорящие, так называемые «острые» пороха, которые способны быстро нарастить давление в камере и разогнать жидкость на коротком расстоянии, то это может вызывать очень резкое нарастание давления, вплоть до перехода горения в детонацию. Это, в свою очередь, вызывает необходимость увеличивать толщину стенок ствола и приводит к увеличению его массы. Кроме того, такие пороха обычно очень быстро сгорают и после достижения максимума давления следует резкий его спад, что, в свою очередь, ведет к уменьшению энергии струи и, соответственно, ее разрушающей способности. А применение медленно горящих «тупых» порохов не дает возможности получить достаточную скорость головы струи, кроме того, они за время истечения струи не успевают сгореть и выбрасываются из ствола, не отдав в полной мере свою энергию.

Таким образом, значение давления струи в стволе ГДУ, с одной стороны, ограничено обеспечением достаточной скорости струи, а с другой стороны, обеспечением безвзрывного обезвреживания ВОП и, следовательно, необходимостью увеличения массогабаритных параметров ГДУ. Поэтому, оптимизация параметров внутренней баллистики пороховой ГДУ, которая позволит снизить максимальное давление струи в стволе ГДУ при обеспечении необходимой скорости струи, является актуальной.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

**Целью данной работы является оптимизация параметров внутренней баллистики пороховой гидропушки для снижения максимального давления в стволе ГДУ при сохранении максимальной скорости**

истечения струи и, как следствие, для обеспечения эффективного бездетонационного обезвреживания ВОП, в том числе в металлических толстостенных корпусах, при снижении массогабаритных параметров ГДУ.

**Исходные данные.** За базовую конструкцию взята безударная гидропушка ГДУ-40/20 с профилированным соплом, предназначенная для обезвреживания взрывных устройств с массой ВВ до 25 кг, в том числе в прочном металлическом корпусе толщиной до 5 мм, возможно применение под водой на глубинах до 40 м (рис. 1).



Рисунок 1 – Гидропушка ГДУ-40/20 и результаты ее применения  
 а – ствол ГДУ-40/20, б – система обезвреживания на базе ГДУ-40/20;  
 в – результат эксперимента по разрушению стальной пластины толщиной 6 мм; г – результат обезвреживания морской объектовой подвесной мины (масса ВВ – 25 кг, тип – МС (морская смесь: тротил, гексоген, алюминий), количество степеней защиты от обезвреживания – 5, установленная глубина – 20 м)

При применении гидропушки допускается срабатывание ВОП со снижением его разрушающего действия на 85-90 %. Масса ГДУ-40/20 в снаряженном состоянии, с креплением и элементами плавучести – 25 кг.

На рис. 2 приведена схема гидропушки ГДУ-40/20. Исходные данные для оптимизации параметров ГДУ приведены в таблице 1.

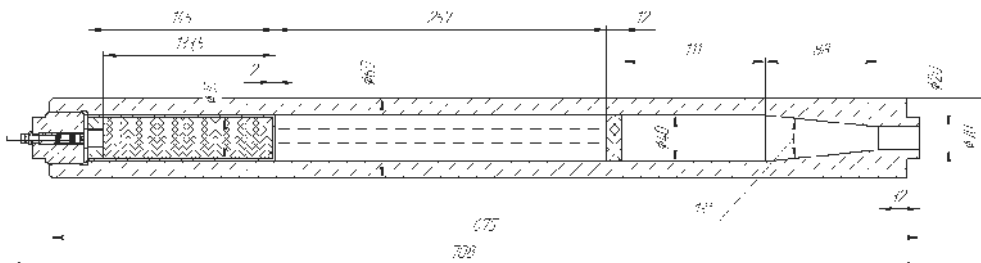


Рисунок 2 – Схема ГДУ-40/20 (в дальнейших расчетах данная конструкция гидропушки взята за базовую)

Таблица 1 – Параметры базового ГДУ

Наименование параметра ГДУ и его условное обозначение	Значение параметра
Объем камеры, $V_{k0}$ , см <sup>3</sup>	135
Марка пороха	Образец № 1
Начальная масса пороха, $m_p$ , г	100
Масса водяного заряда, $m_w$ , г	323
Длина разгона водяного заряда, $L_c$ , мм	123
Давление внутри ствола базового образца, МПа	Не более 980
Давление в камере, $p_{kam}$ , МПа	Не более 350
Внешние размеры ГДУ	Не существенны
Внутренние размеры ГДУ	См. рисунок 2

Необходимо выполнить оптимизацию параметров внутренней баллистики гидропушки ГДУ-40/20, которая позволит снизить давление в стволе ГДУ и обеспечит бездетонационное обезвреживание ВОП.

### ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ СОГЛАСНО ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧЕ

Расчет внешней баллистики импульсной высокоскоростной струи в воздухе, ее взаимодействия с преградой и разрушения мишени является сложной задачей. Поэтому оценка эффективности разрушения струей преграды часто выполняется по косвенным признакам с учетом параметров внутренней баллистики ГДУ. Согласно данным многочисленных экспериментальных исследований, выполненных Шехтманом, Криворотько и др. авторами, эффективность силового воздействия струи на преграду повышается с увеличением скорости струи  $u_{max}$  [17-20]. Базовая конструкция гидропушки обеспечивает скорость головы струи 1200 м/с, что достаточно не только для пробивания прочной оболочки, но и разрушения монолита ВВ и разброса продуктов разрушения, дальнейшее же увеличение скорости головы струи приводит к увеличению вероятности несанкционированной детонации. Поэтому дальнейшее увеличение скорости струи при оптимизации ГДУ не целесообразно.

Известно, что при истечении из сопла ГДУ скорость жидкости на срезе сопла, как правило, быстро убывает. В результате передние частицы

струи движутся быстрее задних, в струе развивается кавитация, и давление струи на преграду существенно снижается с увеличением расстояния выстрела. Для оценки дальнобойности ГДУ в работе [21] был введен коэффициент компактности струи  $k_v$ , который равен обратной величине безразмерного модуля градиента скорости струи, усредненного по длине ее высокоскоростного участка, скорость жидкости в котором не меньше некоторой  $u_{min}$ :

$$k_v = \left( \left( \frac{du}{dx} \left( \frac{L_s}{u_{max}} \right) \right)^{-1} = \left( \frac{u_{max} - u_{min}}{L_{max}} \cdot \frac{L_s}{u_{max}} \right)^{-1} \right),$$

где  $L_{max}$  – длина высокоскоростного участка струи, за масштабы выбраны  $u_{max}$  и  $L_s$  – длина сопла. Минимальная скорость высокоскоростного участка выбрана такой, что давление и удельная кинетическая энергия струи при такой скорости составляют половину максимальных значений. Тогда

$$u_{min} = u_{max} / \sqrt{2} \approx 0,7u_{max}.$$

Чем больше  $k_v$ , тем меньше градиент скорости по длине струи, который является причиной развития кавитации и распада струи, тем компактнее струя и больше ее дальнобойность. На основании предварительных расчетов установлено, что  $k_v$  должно быть не менее 4.

Как правило, обеспечение высокой скорости и разрушающей способности импульсной струи ГДУ сопровождается ростом давления в корпусе установки. Низкая надежность всех гидроимпульсных установок обусловлена высоким давлением внутри установки и является существенным недостатком. В качестве критериев, характеризующих давление в установке и ее надежность, используются максимальное давление  $p_{max}$  внутри установки и коэффициент превышения давления  $k_p$ .

Чем меньше давление, тем меньше износ деталей установки и выше надежность. Давление  $p_{max}$  ограничивается прочностью корпуса установки, поэтому рост давления повышает требования к прочностным характеристикам корпуса и сопряжен с увеличением массы и габаритов ГДУ.

Коэффициент превышения давления  $k_p$  показывает во сколько раз давление гидронапора струи  $u_{max}^2 / 2$  больше максимального давления в установке  $p_c$ , и определяется по формуле  $k_p = u_{max}^2 / 2p_c$ . Г.А. Атановым было показано, что для гидроимпульсных установок типа импульсного водомета (ИВ)  $k_p < 1$ . По этому параметру ГДУ значительно эффективнее. Для ГДУ  $k_p$  может превышать «1» в несколько раз [22, 23]. В настоящей работе  $k_p$  использовался не только в качестве критерия оценки эффективности ГДУ, но и для определения режима ее работы.

Еще одним важным параметром, который необходимо учитывать при оптимизации внутренней баллистики гидропушки и который влияет на ее прочностные и массогабаритные характеристики, является давление в камере. Установлено, что для базовой конструкции ГДУ давление в камере не должно превышать 350 МПа.

Следовательно, для обеспечения эффективности бездетонационного обезвреживания ВОП необходимо, чтобы выполнялись нижеприведенные условия:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{max} \approx u_{max\ baz}, \\ p_{max} < p_{max\ baz}, \\ k_v \geq 4, \\ k_p > 1, \\ p_{kam} \leq 350\ \text{МПа}, \end{array} \right.$$

где  $u_{max}$ ,  $u_{max\ baz}$  – максимальная скорость истечения струи оптимального и базового ГДУ;  $p_{max}$ ,  $p_{max\ baz}$  – максимальное давление воды в стволе оптимизированного и базового ГДУ;  $p_{kam}$  – давление в камере ГДУ.

### ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

В [22, 23] показано, что при выстреле ГДУ ускорение жидкости происходит в результате нестационарного втекания в сужающееся сопло. Достигая среза сопла, жидкость истекает из него импульсной высокоскоростной струей. Истечение, как правило, сопровождается снижением скорости жидкости на срезе сопла. Однако, при определенном выборе конструкции ГДУ, можно добиться необходимой скорости истечения, и тем самым существенно повысить компактность струи, длину и массу ее высокоскоростного участка. При этом ускорение жидкости происходит в два этапа: на начальном этапе жидкость ускоряется в результате нестационарного втекания в сужающееся сопло (инерционная фаза разгона жидкости), а затем, при выдавливании из сужающегося сопла под действием давления пороховых газов или поршня (экструзионная фаза). Увеличение влияния экструзионной фазы выстрела приводит к повышению давления в установке и снижению коэффициента превышения давления  $k_p$ . При этом  $k_p$  может становиться меньше «1», тем самым ГДУ теряет основное свое преимущество перед ИВ – способность генерировать струи высокой скорости при сравнительно низких давлениях жидкости в установке. Многочисленные расчеты показали, что в случае, когда  $k_p$  ГДУ становится меньше «1», форма сопла ГДУ перестает оказывать заметное влияние на ее основные гидродинамические параметры. Таким образом, ГДУ приобретает сходство с ИВ по следующим важным отличительным характеристикам: экструзионный разгон жидкости,  $k_p < 1$ , слабое влияние формы сопла на основные гидродинамические параметры. Такой режим работы ГДУ можно назвать режимом ИВ.

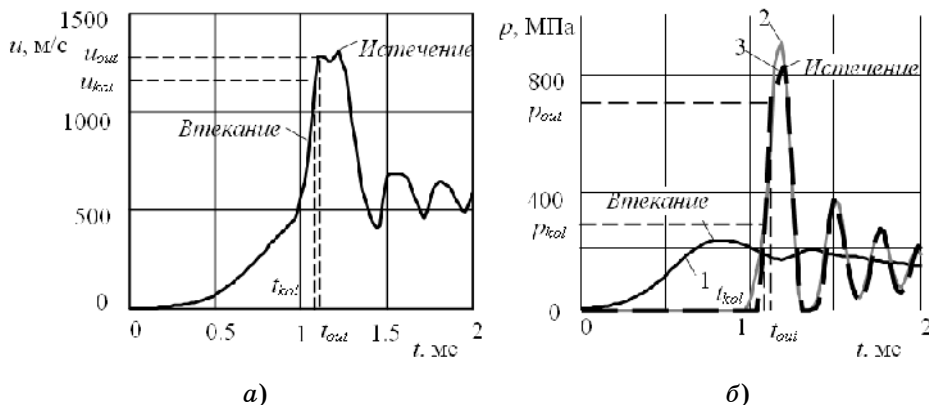


Рисунок 3 – Зависимость от времени параметров исходного ГДУ  
а) – скорость втекания и истечения; б) – давления в разных сечениях

На рис. 3 представлены зависимости от времени параметров ГДУ исходной конструкции. На рис. 3а – зависимость скорости втекания и истечения жидкости из сопла, а на рис. 3б – зависимость давления в камере сгорания и в разных сечениях сопла от времени. Время, скорость на срезе сопла и давление в момент начала истечения обозначены нижними индексами *out*, а в момент начала втекания в коллиматор – индексами *kol*. Линия 1 – давление в камере, линия 2 – давление на входе в сопло, линия 3 – давление в сечении  $L_s / 2$ , где  $L_s$  – длина сопла. Из рис.3 видно, что для исходного ГДУ влияние экструзионной фазы выстрела достаточно для обеспечения максимальной скорости жидкости после начала втекания в коллиматор и истечения. А давление жидкости после начала истечения продолжает расти. Максимальное давление в камере не превышает 250 МПа, а максимальное давление в установке не больше, чем 1000 МПа.

Как отмечалось ранее, процесс ускорения жидкости можно условно разделить на две фазы. Инерционная фаза начинается с началом втекания жидкости в сужающуюся часть сопла и заканчивается в момент достижения жидкостью коллиматора. Затем действует экструзионный механизм разгона жидкости, который заканчивается в тот момент, когда скорость жидкости на входе в коллиматор начинает убывать. На рис. 4 представлены распределения параметров по координате в момент окончания инерционной и экструзионной фаз выстрела (4а и 4б соответственно). Кривая 1 на рисунке – зависимость давления от координаты, кривая 2 – скорости от координаты.

Из рис. 4 видно, что момент окончания фазы экструзионного разгона жидкости совпадает с моментом окончания расширения пороховых газов и остановки контактной поверхности.

Расчеты показали, что для данного ГДУ  $k_p = 0,94$ .

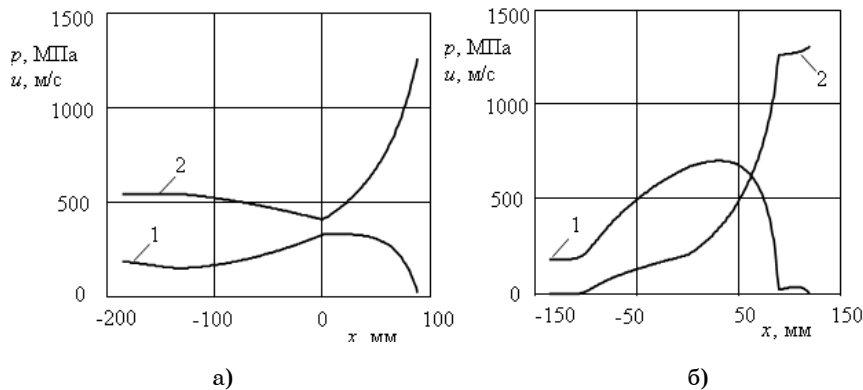


Рисунок 4 – Распределение параметров исходного ГДУ по координате в моменты окончания инерционного (а) и экструзионного (б) разгона жидкости

В настоящей работе выполнены расчеты основных параметров ГДУ с соплами разной формы, которые нашли широкое применение в гидродинамике [22, 25].

В табл. 2 представлены расчетные значения критериев оценки эффективности ГДУ для сопел разной формы, а также разница максимального и минимального значений критериев в процентах, а на рис. 5 – зависимость скорости втекания и истечения жидкости для конического сопла и профиля Витошинского (кривые 1 и 2).



Таблица 2 – Влияние формы сопла на параметры исходной ГП

Сопло	$u_{max}$ , м/с	$p_{max}$ , МПа	$k_p$	$k_v$
Коническое	1308	910	0,94	7,5
Экспоненциальное	1302	909	0,93	7,3
Катеноидальное	1287	901	0,92	7,7
Витошинского	1307	931	0,92	8,5
Коноидальное	1288	901	0,90	7,2
<b>Разница, %</b>	<b>1,6</b>	<b>3,2</b>	<b>4,2</b>	<b>15,3</b>

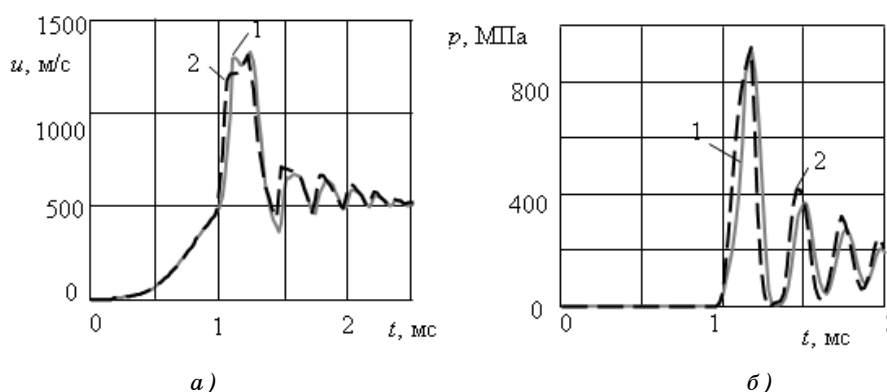


Рисунок 5 – Зависимости параметров ГДУ с коническим соплом и соплом Витошинского от времени: а – скорость втекания и истечения; б – давление на входе в сопло

Из табл. 2 и рис. 5 видно, что влияние формы сопла на основные гидродинамические параметры ГДУ исходной конструкции, такие как скорость струи и давление в корпусе не существенно. Значения этих параметров для разных сопел отличаются не более чем на 5 %. Компактность струи зависит от формы сопла более заметно (различие около 15 %). Наиболее компактна струя ГДУ с соплом Витошинского, которое имеет наиболее плавный профиль на входе и выходе. Различия в компактности струй установок с соплами других профилей незначительно и не превышает 6,5 %. Дополнительное повышение компактности струи может быть достигнуто путем увеличения длины коллиматора за счет сужающейся части сопла. Однако такая модификация конструкции приведет к увеличению влияния экструзионной фазы разгона жидкости на процесс выстрела, что способствует понижению скорости струи при снижении давления в установке.

#### СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСТРУЗИОННОЙ ФАЗЫ НА ПРОЦЕСС ВЫСТРЕЛА

При увеличении влияния инерционной фазы на процесс выстрела можно снизить давление в установке при обеспечении достаточной скорости струи, а также получить возможность использовать форму сопла ГДУ в качестве управляющего параметра для оптимизации установки. Следует заметить, что при этом вероятно снижение компактности и дальнобойности струи ГДУ. Оценочные расчеты показали, что давление на преграду, оказываемое при ударе струей с  $k_v \approx 4$ , превышает давление гидронапора струи даже на расстоянии выстрела около 1 м. Поэтому был сделан вывод о том, что значение  $k_v$  оптимального ГДУ должно быть не меньше 4.

Таким образом, для увеличения степени влияния формы сопла на параметры ГДУ и, следовательно, обеспечения его эффективной работы необходимо уменьшить степень влияния экструзионной фазы выстрела, которая зависит от длины сужающегося сопла и заряда воды. Исследования показали, что изменение марки пороха, массы пороха (на 20%), радиусов входа и выхода сопла (до 20%) не позволяет существенно снизить влияние экструзионной фазы на процесс выстрела и повысить  $k_p$  установки до значений выше «1», сохранив скорость выстрела больше 1000 м/с. Поэтому были выполнены следующие действия:

1. Замена сопла с коллиматором соплом без коллиматора и увеличение длины сопла на 20% по сравнению с исходным позволяет увеличить длину сужающейся части сопла на 64%. В результате для ГДУ с коноидальным, катеноидальным и экспоненциальным соплами при незначительном изменении скорости струи (до 2%) существенно уменьшается давление в установке (около 10% для экспоненциального и катеноидального и 15% для коноидального сопла) и увеличивается  $k_p$ .

2. Увеличение длины пути разгона воды в стволе за счет уменьшения длины заряда воды на 20% для коноидального сопла обеспечивает наименьшее давление в установке. При этом скорость струи результирующей установки на 9% превышает скорость струи исходной установки с соплом коноидальной формы, а давление в корпусе снижено на 18%.

В таблице 3 представлены результаты расчета параметров полученной ГДУ с соплами разной формы.

*Таблица 3 – Параметры ГДУ после снижения влияния экструзионной фазы разгона жидкости*

Сопло	$u_{max}$ , м/с	$p_{max}$ , МПа	$k_p$	$k_v$
Коническое	1421	935	1,08	5,9
Экспоненциальное	1421	813	1,24	4,9
Катеноидальное	1431	814	1,26	5,4
Витошинского	1419	893	1,13	5,1
Коноидальное	1412	737	1,36	5,1
<b>Разница, %</b>	<b>1,3</b>	<b>21,2</b>	<b>20,6</b>	<b>16,9</b>

Из табл. 3 видно, что в результате снижения экструзионного и увеличения инерционного разгона жидкости удалось существенно снизить давление в установке при незначительном повышении скорости струи. Максимальный эффект достигнут для установки с коноидальным соплом – давление снижено на 18 %. Максимальное значение коэффициента превышения давления достигается также для установки с коноидальным соплом и составляет 1,36. При таком значении  $k_p$  влияние формы сопла на параметры установки существенно, поэтому возможна дальнейшая оптимизация ГДУ путем изменения формы ее сопла. Поскольку изготовление сопла сложной формы сопряжено с рядом технологических трудностей, исходный профиль был заменен набором конических.

#### ОПТИМИЗАЦИЯ СОПЛА ГДУ

Оптимизация сопла ГДУ выполнена согласно следующему алгоритму. Изначально рассматривалось двойное коническое сопло, с координатой точки излома, равной  $0,5L_s$ , и радиусом сопла в точке излома, равным радиусу коноидального сопла в этой точке, как это показано на рис. 6. Кривая 1 на рис.6 – зависимость радиуса коноидального сопла от

координаты, а кривая 2 – зависимость радиуса двойного конического сопла.

На первом шаге выполнен расчет значений критериев эффективности ГДУ для полученного составного конического сопла.

Затем произведен поиск оптимального положения точки А. При этом значение координаты  $x_s$  точки А варьировалось от  $0,2L_s$  до  $0,8L_s$  с шагом  $0,2L_s$ . Результаты расчетов значений критериев для полученных сопел представлены в табл. 4.

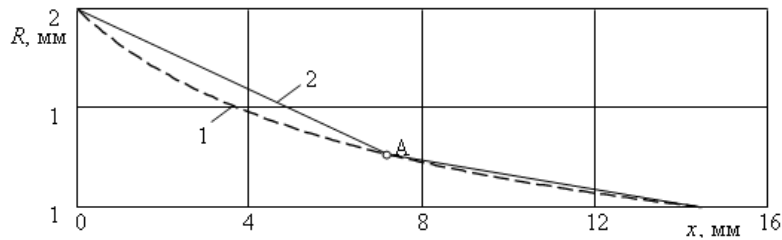


Рисунок 6 – Зависимость от координаты двойного конического и конoidalного сопел

Таблица 4 – Зависимость параметров ГДУ с двойным коническим соплом от положения ключевой точки

$x_{s1}$	$u_{max}$ , м/с	$p_{max}$ , МПа	$k_p$	$k_v$
$0,5L_s$	1429	715	1,43	4,7
$0,2L_s$	1401	788	1,25	4,97
$0,4L_s$	1410	756	1,31	5,37
$0,6L_s$	1415	765	1,31	4,82
$0,8L_s$	1432	999	1,03	5,06

По результатам расчетов выполнена комплексная оценка эффективности сопел  $K_{ef}$  [17] по выбранным критериям:  $u_{max}$ ,  $p_{max}^{-1}$ ,  $k_p$ ,  $k_v$ . Для оценки было взято обратное значение максимального давления в установке, поскольку эффективность установки снижается с ростом  $p_{max}$ . Значения критериев для каждого  $i$ -го сопла вычислялись по формуле  $\tilde{u}_i = 100 \cdot u_i / \max(u_i)$ , а затем суммировались. Наиболее эффективным считается сопло, для которого сумма критериев  $K_{ef}$  максимальна. Результаты расчетов представлены в табл.5.

Таблица 5 – Зависимость эффективности ГДУ с двойным коническим соплом от положения ключевой точки

$x_{s1}$	Значение $K_{ef}$ , полученное от критериев				$\Sigma K_{ef}$
	$u_{max}$ , м/с	$p_{max}$ , МПа	$k_p$	$k_v$	
$0,5L_s$	99,8	100	100	87,5	387,3
$0,2L_s$	97,8	90,7	87,2	92,6	368,3
$0,4L_s$	98,5	94,6	92,1	100,0	385,1
$0,6L_s$	98,8	93,5	91,6	89,8	373,7
$0,8L_s$	100	71,6	71,9	94,2	337,7

Затем по полученным данным методом сплайн интерполяции была построена функция зависимости  $(x_s)$  и определена координата ее максимума  $X$  (рис. 7). Координата  $x_{s1} = X$  считается оптимальной координатой ключевой точки. При необходимости положение оптимальной точки излома уточняется при помощи дополнительных расчетов в окрестности предполагаемого максимума.

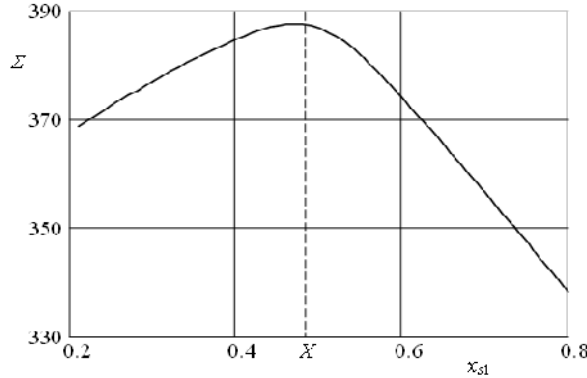


Рисунок 7 – Зависимость эффективности ГДУ с двойным коническим соплом от координаты ключевой точки

Далее по аналогичному алгоритму был определен оптимальный радиус сопла в полученной точке излома. Значение радиуса варьируется в интервале  $R_{s1} \in [R_s + 0,2 R; R_s + 0,8 R]$ , где  $R = R_c - R_s$ ,  $R_c$  – радиус ствола;  $R_s$  – радиус среза сопла.

На основе полученного оптимального двойного конического сопла было определено оптимальное составное коническое сопло из трех конусов. Излом добавлялся в точке с координатой  $x_{s2} = 0,25 L_s$ . Радиус сопла в точке излома был выбран равным радиусу оптимального двойного конического сопла в этой точке. Положение и радиус добавленной точки излома варьировались в интервале  $x_{s2} \in [0,2x_{s1}; 0,8x_{s1}]$  и  $R_{s2} \in [R_{s1} + 0,2 R_1; R_{s1} + 0,8 R_1]$  соответственно, где  $R_1 = R_c - R_{s1}$ .

Для определения положение последней, третьей, точки излома и радиуса сопла в этой точке за основу бралось полученное оптимальное тройное коническое сопло. Начальное положение третьей точки излома задавалось равным  $x_{s3} = 0,75 L_s$ , а начальный радиус равным радиусу тройного конического сопла в этой точке. Положение точки излома и радиус сопла варьировались в интервале  $x_{s3} \in [x_{s1} + 0,2 x_1; x_{s1} + 0,8 x_1]$  и  $R_{s3} \in [R_s + 0,2 R_2; R_s + 0,8 R_2]$ , где  $x_1 = L_s - x_{s1}$ ,  $R_2 = R_{s1} - R_s$ .

Расчеты показали, что оптимальным является составное коническое сопло из трех конусов, зависимость радиуса которого от координаты представлена на рис. 8.

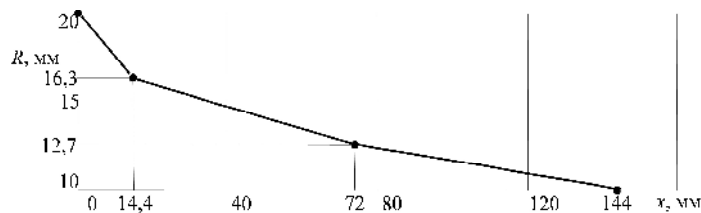


Рисунок 8 – Зависимость радиуса оптимального сопла от координаты

В табл. 6 представлены расчетные значения основных гидродинамических параметров, характеризующих эффективность ГДУ, а также разница, показывающая изменение критериев по сравнению с базовыми значениями в процессе оптимизации.

Таблица 6 – Основные параметры ГДУ разных конструкций

ГДУ	$u_{max}$ , м/с	$p_{max}$ , МПа	$k_p$	$k_v$
Оптимальное	1410	680	1,46	5
Исходное	1308	910	0,94	7,5
<b>Разница, %</b>	<b>7,8</b>	<b>25,3</b>	<b>55,3</b>	<b>-33,3</b>

В результате проведенной оптимизации максимальное давление в установке снижено на 25,3% при увеличении скорости струи на 7,8 %, при этом коэффициент превышения давления увеличился примерно в 1,5 раза по сравнению с исходным значением, а коэффициент компактности струи снижен на 33,3%. Снижение коэффициента компактности при оптимизации выбранной установки необходимо для снижения влияния экструзионной фазы разгона жидкости на параметры выстрела, и потому неизбежно для снижения давления в установке и обеспечения необходимой скорости струи. Для результирующей установки  $k_v = 5$ . Оценочные расчеты показали, что струя, коэффициент компактности которой равен 4, при расстоянии выстрела 1 м оказывает при столкновении большее давление на преграду, чем давление гидронапора струи, поэтому при  $k_v = 5$  дальнобойность струи достаточная.

По результатам расчетов проведена комплексная оценка эффективности полученной оптимальной установки по сравнению с исходной. Результаты оценки приведены в табл. 7.

Таблица 7 – Сравнение эффективности ГП разных конструкций

ГДУ	Значение $K_{ef}$ , полученное от критериев				$\Sigma K_{ef}$
	$u_{max}$ , м/с	$p_{max}$ , МПа	$k_p$	$k_v$	
Исходное	92,7	74,8	64,4	100,0	331,9
Оптимальное	100	100	100	66,7	366,7

По данным табл. 7 установлено, что итоговая эффективность установки повышена в результате оптимизации примерно на 10 %. Увеличение эффективности достигнуто по всем выбранным критериям, кроме коэффициента компактности струи.

Известно, что при равных значениях давлений предпочтительнее та установка, в которой максимум давления приходится на более узкую часть сопла. Положение максимума давления в установке определяется следующим образом. Сначала необходимо получить зависимость максимального по длине установки давления от времени (рис. 9а), а затем – зависимость давления от координаты на момент времени, в который давление в корпусе установки достигает максимума (рис. 9б). На рис. 9 представлены зависимости давлений в корпусе установки от времени и координаты. Кривая 1 обозначает давление в исходной установке, кривая 2 – в оптимальной.

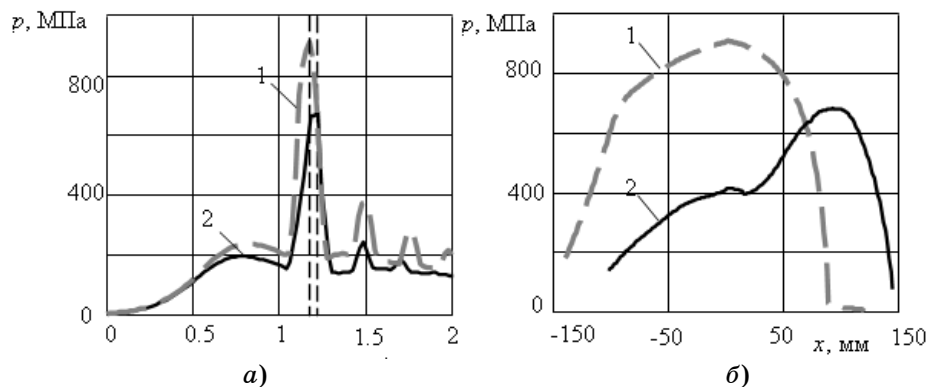


Рисунок 9 – Зависимости давлений в корпусе исходного и оптимального ГДУ:  
 а) – зависимость максимального давления от времени, б) – зависимость давления от координаты

В отличие от исходной установки, максимум давления в которой достигается на входе в сопло, максимальное давление в результирующей установке достигается в сужающейся части сопла, в точке с координатой  $x \approx 0,64 L_s$  и радиусом  $R \approx 0,6 R_c$ . Это означает, что даже при равных давлениях надежность оптимальной установки была бы выше.

#### ВЛИЯНИЕ МАССЫ И ТИПА ПОРОХА НА ПАРАМЕТРЫ ГДУ

В процессе оптимизации расчет установки выполнялся для пороха № 1. Масса заряда пороха составляла 100 г и была неизменной. Затем были выполнены расчеты параметров полученной установки с порохом № 2 и № 1, масса которого варьировалась в пределах 80-120 г. Результаты расчетов представлены в табл. 8.

Таблица 8 – Зависимость параметров ГДУ от массы и типа пороха

Тип пороха	$m_p, \text{ г}$	$u_{max}, \text{ м/с}$	$p_{max}, \text{ МПа}$	$k_p$	$k_v$
N 1	80	1127	386	1,65	4,2
	100	1410	681	1,46	5
	120	1712	1245	1,18	4,9
N 2	80	1439	745	1,39	4,7
	100	1687	1323	1,08	4,8
	120	2110	2422	0,92	5,6

Согласно табл. 8 замена пороха № 1 порохом № 2 приводит к существенному росту скорости струи (около 20%), а также давления в установке (примерно в 2 раза). Коэффициент превышения давления при этом снижается примерно на 15-20%. Поскольку скорость сгорания пороха № 2 выше, скорость выстрела установки с таким порохом меньше. При этом втекание жидкости в сопло ГДУ происходит за меньшее время, и в момент начала истечения давление пороховых газов выше. В результате замена пороха № 1 порохом № 2 приводит к увеличению влияния на процесс выстрела экструзионной фазы разгона жидкости.

Аналогичный результат получается при увеличении массы заряда пороха. Чем больше масса заряда, тем выше давление пороховых газов и скорость сгорания пороха. Поэтому увеличение массы порохового заряда также приводит к снижению  $k_p$  и повышению влияния экструзионной фазы на процесс выстрела.

По данным результатов табл. 8 была выполнена комплексная оценка эффективности разных типов и массы пороха для конкретной установки. Результаты оценки представлены в табл. 9.

Таблица 9 – Сравнение эффективности порохов разной массы и типа

Тип пороха	Значение $K_{ef}$ , полученное от критериев					$\Sigma K_{ef}$
	$m_p$ , г	$u_{max}$ , м/с	$p_{max}$ , МПа	$k_p$	$k_v$	
N 1	80	53,4	100	100	75	328,4
	100	66,8	79,9	88,8	89,3	324,8
	120	81,2	65,8	71,5	87,5	306,0
N 2	80	68,2	78,3	84,5	83,9	314,9
	100	80,0	66,8	65,3	85,7	297,8
	120	100	53,4	55,9	100	309,3

Из табл. 9 видно, что изменение массы и марки пороха не приводит к существенному изменению эффективности установки, но существенно влияет на каждый из критериев в отдельности. Согласно результатам комплексного сравнения эффективности наиболее эффективным является порох № 1 массой заряда 80 г, а наименее эффективным – порох № 2, массой заряда 100 г. Значения рейтинга для этих порохов отличается примерно на 9%.

Давление в корпусе полученной установки с порохом № 1 массой 80 г в 2,4 раза меньше давления в исходной установке, однако снижение массы заряда на 20% приводит к существенному снижению скорости и компактности струи и уменьшает ее дальнобойность и силовое воздействие на преграду. Поэтому для конкретной задачи более эффективным может быть заряд порохом № 1 массой 100 г, либо порохом № 2 массой 80 г. Такой выбор порохового заряда обеспечивает достаточную скорость и компактность струи при сравнительно небольших значениях давлений в корпусе.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ ГДУ

Зависимости от времени гидродинамических параметров базовой и оптимальной установок представлены на рис. 10 в виде графиков. Параметрам базовой установки соответствуют кривые 1 и 3, а параметрам оптимальной установки – кривые 2 и 4.

На рис. 10 а представлены зависимости скорости втекания и истечения жидкости из сопла исходного и оптимального ГДУ от времени. Для каждой из установок отмечен момент начала истечения. Установлено, что струя оптимального ГДУ является менее компактной, чем струя базовой установки. Тем не менее, в струе оптимального ГДУ также имеется небольшой участок жидкости примерно одинаковой скорости, что позволяет сделать вывод о сравнительно высокой дальнобойности установки.

На рис. 10 б представлены зависимости от времени давлений в различных сечениях исходного и оптимального ГДУ (кривые 1 и 2), в которых давления достигают максимума, а так же зависимости от времени давлений в камере (кривые 3 и 4). Установлено, что давление жидкости в оптимальном ГДУ значительно ниже, чем давление в ГДУ исходной конструкции. Давление пороховых газов в камере удовлетворяет указанным ограничениям и не превышает 350 МПа. При этом максимальное давление пороховых газов в камере оптимальной установки несколько ниже, чем в исходной, и не превышает 200 МПа.

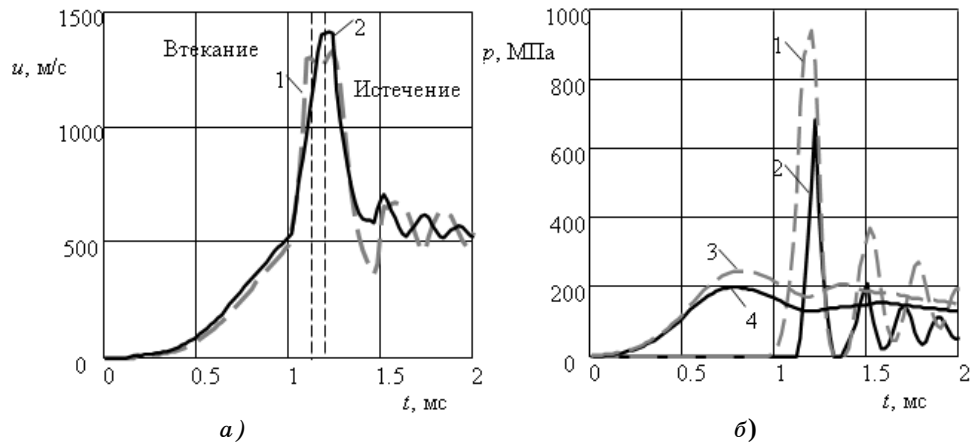


Рисунок 10 – Сравнение параметров ГДУ базовой и оптимальной конструкции: а) зависимость скорости втекания и истечения от времени; б) зависимость давления в корпусе от времени

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают полученные теоретические результаты (рис. 11). Параметры оптимального ГДУ представлены в таблице 10.

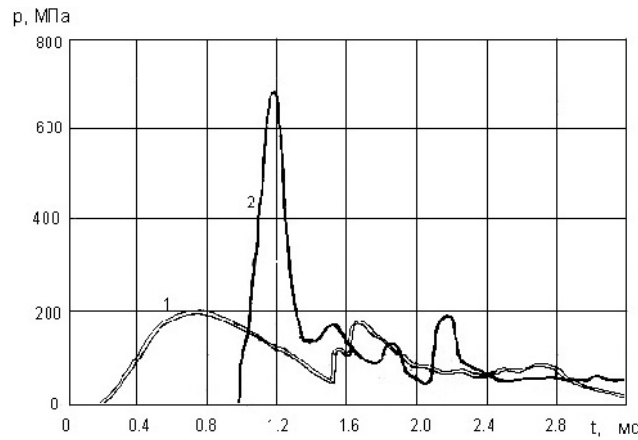


Рисунок 11 – Зависимость давления в корпусе оптимального ГДУ от времени (1 – давление в камере сгорания, 2 – давление в сужающейся части сопла, в точке с координатой  $x \approx 0,64L_s$  и радиусом  $R \approx 0,6R_c$ )

Таблица 10 – Параметры оптимального ГДУ

Наименование параметра ГДУ и его условное обозначение	Значение параметра
Объем камеры сгорания, $V_{k0}$ , см <sup>3</sup>	135
Марка пороха	Образец N 1
Начальная масса пороха, $m_p$ , г	100
Масса водяного заряда, $m_w$ , г	258
Длина разгона водяного заряда, $L_c$ , мм	174
Особенности конструкции ГП	Сопло составное коническое из трех конусов (рис. 8)

В результате проведенной оптимизации внутренней баллистики гидропушки за счет изменения конструкции сопла, а также снижения



массы водяного заряда на 20% и увеличения длины разгона на 41% получено

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{max} < p_{max\ baz} \text{ на } 25,5\%; \\ u_{max} > u_{max\ baz} \text{ на } 7,7\%; \\ k_p = 1,46 > 1; \\ k_v = 5 > 4; \\ p_{kam} = 200 \text{ МПа} < 350 \text{ МПа}. \end{array} \right.$$

## ВЫВОДЫ

При оптимизации параметров внутренней баллистики пороховой гидропушки ГДУ-40/20 снижено максимальное давление струи в стволе гидропушки на 25,2% при повышении скорости истечения струи на 7,7%. Оптимизация была выполнена за счет увеличения длины разгона водяного заряда на 41% и снижения его масса на 20%, а также замены исходной конструкции сопла на составную коническую, состоящую из 3 конусов определенных длин и радиусов.

Однако снижение массы водяного заряда может привести к уменьшению длины струи и ее интегрального импульса до значений, недостаточных для разрушения монолита ВВ и разброса продуктов разрушения. Поэтому дальнейшие исследования по оптимизации внутренней баллистики ГДУ целесообразно проводить в области оптимизации конструкции сопла, а также порохового заряда со специальными свойствами. Это позволит снизить давление импульсной струи жидкости на ствол ГДУ при сохранении достаточной скорости струи и, как следствие, обеспечит эффективное бездетонационное обезвреживание ВОП, в том числе в металлических толстостенных корпусах, при минимизации массогабаритных показателей ГДУ.

## SUMMARY

### PARAMETER OPTIMIZATION OF A WATERJET DISRUPTER TO PROVIDE AN EFFICIENT EXPLOSIVE ORDNANCE DISPOSAL

*A.N.Semko\**, *V.V. Reshetniak\*\**, *M.V. Dubrovkina\*\*\**, *V.A. Bigvava\*\*\**,

\* *Donetsk National University, Donetsk, Ukraine;*

\*\* *Vladimir State University, Vladimir, Russia;*

\*\*\* *Scientific Research and Project Designing Institute "Iskra", Lugansk, Ukraine*

*The article describes the parameter optimization of internal ballistics of a powder waterjet disrupter to provide the lowering of the maximal pressure in the barrel of a hydrodynamic device on retention of the maximal velocity of the jet efflux to provide an efficient non-denotative explosive ordnance disposal and lowering of the weight/size parameters of the hydrodynamic device.*

**Key words:** *hydrodynamic device, explosive ordnance, powder waterjet disrupter, efficiency of disposal, humanitarian demining.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубровкина М.В. Взрывные устройства, обезвреживаемые методами гуманитарного разминирования / М.В. Дубровкина; НИПКИ «Искра». - Луганск, 2006. - 6 с. - Библиогр.: 2 назв. - Рус. - Деп. в ГНТБ Украины 30.10.06, № 61 - Ук. 2006.
2. IMAS 09.30 Explosive ordnance disposal. First Edition 01 October 2001 - Geneva: GICHD, 2001.
3. Дубровкина М.В. Специальные средства, реагирующие на различные виды взрывчатых веществ (ВВ). Общие технические требования / М.В. Дубровкина // Науковий вісник УНДІ ПВ. - 2007. - № 2 (16). - С. 181-188.
4. Operational Evaluation Test of Mine Neutralization Systems. - Alexandria: Institute for Defense Analyses, 2005. - 93 с. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.itep.ws/pdf/FinalReportNeutSysEval.pdf>

5. Ульшин В.А. Тенденции создания технологий и технических средств для обезвреживания взрывоопасных предметов при проведении операций гуманитарного разминирования / В.А. Ульшин, В.А. Бигвава, Г.Л. Логунова // Науковий вісник Укр НДППВ. – 2009. – №2 (20). – С. 189-196.
6. Исследование теоретических основ приборного, технологического и методического обеспечения гуманитарного разминирования: Отчет о НИР / Министерство образования и науки Украины. Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Искра"; № ГР 0106Г001178; Инв. № 75. – Луганск, 2008. – 897 с.
7. Семко А.Н. Применение импульсных высоконапорных струй жидкости для разрушения взрывоопасных объектов / А.Н. Семко, В.А. Бигвава // Вісник Донецького університету. Сер. А: Природничі науки. - 2009. – Вип. 2. – С. 325-334.
8. Логунова Г.Л. Повышение производственно-экологической безопасности при гуманитарном разминировании и возможности гидродинамических разрушителей / Г.Л. Логунова, Т.В. Козак, М.В. Дубровкина // Стратегия качества в промышленности и образовании: сборник материалов IV Международной конференции. – Технический университет–Варна–Днепропетровск, 2010. – Т.2.
9. Бигвава В.А. Особенности применения гидропушек для обезвреживания взрывоопасных предметов / В.А. Бигвава, А.В. Кочергин, Г.Л. Логунова // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2008. – №4. – С. 24-29.
10. Бигвава В.А. Исследование влияния окружающей среды на параметры внутренней баллистики гидропушки / В.А. Бигвава, А.В. Кочергин, Г.Л. Логунова // Артиллерийское и стрелковое вооружение, 2009. – №2. – С. 44-47.
11. Proparms products. International Industries, Inc [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.internationalindustries.net/Proparms/index.htm>
12. Waterjet disrupter. Mechanical and Chemical Industries Corporation (МКЕ) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://mkek.gov.tr/english/foUrunDetaylari.aspx?iKodUrun=106&iKodUrunKategori=124>.
13. Гидродинамический разрушитель взрывных устройств "СВ-1324". Бюро научнотехнической информации [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.bnti.ru/des.asp?itm=1865&tbl=04.01.03>
14. Петренко Е. С. Разрушители взрывных устройств и других взрывоопасных предметов [Электронный ресурс] / Е. С. Петренко // Специальная техника. – 2002. – №3. – Режим доступа: [http://www.ess.ru/publications/3\\_2002/petrenko/petrenko.htm](http://www.ess.ru/publications/3_2002/petrenko/petrenko.htm)
15. Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Искра». Министерство образования и науки Украины. Главная [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://iskra.lugansk.ua>
16. Шаповалов В.Д. Приборы и технологии для чрезвычайных ситуаций/В.Д. Шаповалов// Надзвичайна ситуація. – 2007. – №8. – С. 56-59.
17. Шехман. Н.В. Опыт разрушения бетона и железобетона импульсными водометами на Днепрогэс-II / Н.В. Шехман, О.Д. Криворотко, В.П. Николаев // Гидротехн. стр-во. – 1976. – № 5. – С. 18-21.
18. Петраков А.И. Разрушение горных пород импульсными струями / А.И. Петраков, О.Д. Криворотко // Уголь. – 1982. – № 3. – С.12-15.
19. Черменский Г. П. Применение импульсных водометов в угольной промышленности / Г. П. Черменский // Технология добычи угля подземным способом. – 1972. – Вып. 4. – С. 83-87.
20. Черменский Г.П. Исследование процесса разрушения углей и пород импульсными струями сверхвысокого давления / Г.П. Черменский // Труды ВНИИГидроугля. – Новокузнецк, 1967. – Вып. 11. – С. 7-11.
21. Семко А.Н. Сравнение эффективности сопел разной формы для сверхзвуковой гидропушки / А.Н. Семко, В.В. Решетняк // Вісник Донецького університету. Серія А: Природничі науки. – 2009. – Вип. 2. – С. 78-86.
22. Атанов Г.А. Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород /Г.А. Атанов.– К.: Вища школа, 1987.– 155 с.
23. Семко А.Н. Импульсные струи жидкости высокого давления / А.Н. Семко. – Донецк: Вебер (Донецкое отделение), 2007. – 149 с.
24. Семко А.Н. Влияние конусности сопла на параметры порохового ИВ / А.Н. Семко // Вісник Донецького університету. Серія А: Природничі науки.– 2001. – Вип. 1. – С. 66-70.
25. Атанов Г.А. Исследование внутренней баллистики гидропушки / Г.А. Атанов, А.Н. Семко, Ю.Д. Украинский // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1983. – № 4. – С. 168-170.

*Поступила в редакцию 4 августа 2010 г.*