

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СНАРЯДОВ С ПРЯМОТОЧНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ СТРЕЛБЫ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ СИСТЕМ ЗА РУБЕЖОМ

USE OF RAMJET-ASSISTED PROJECTILES FOR INCREASING THE FIRING RANGE OF FOREIGN ARTILLERY SYSTEMS

По представлению академика РАРАН В.М. Кашина

В.Д. Баскаков, В.Т. Калугин, Л.А. Розанов, Н.И. Сидняев

МГТУ им. Н.Э. Баумана

V.D. Baskakov, V.T. Kalugin, L.A. Rozanov, N.I. Sidnyaev

В статье представлены результаты анализа публикаций в открытых иностранных источниках с 1998 г., посвященных созданию дальнобойных снарядов с твердотопливным прямоточным воздушно-реактивным двигателем (ПВРД) для артиллерийских систем зарубежных стран. Оценены основные характеристики четырех различных снарядов калибра 155 мм разработки ЮАР, Южной Кореи, Индии и США, в том числе предполагаемая дальность и масса разрывного заряда. Отмечен ряд проблем, которые ожидаются при адаптации этих технических решений к современным артиллерийским комплексам. Показано, что имеющиеся в открытом доступе схемы снарядов могут достигать заявленных значений дальности полета в первую очередь за счет высокой начальной скорости и работы ПВРД. Приведены предположения о конструкции и характеристиках будущего зарубежного снаряда с ПВРД, который может быть использован в артсистемах стран НАТО.

Ключевые слова: увеличение дальности, прямоточный воздушно-реактивный двигатель на твердом топливе, артиллерия, зарубежные вооруженные силы.

Presented are results of analysis of unclassified contributions in foreign information sources published since the year 1998 and concerning long-range artillery projectiles with solid-fuel ramjet (SFRJ) engines for use in foreign artillery systems. Basic characteristics including supposed range and explosive charge weight are estimated for four different 155 mm projectiles developed in South Africa, South Korea, India, and USA. A number of problems expected during the fitting of these designs into existing artillery complexes are highlighted. It is shown that unclassified foreign SFRJ projectile designs are capable of achieving their listed maximum range primarily by means of high initial velocity and SFRJ performance. Informed speculations on the design and characteristics of a future SFRJ-assisted projectile for NATO artillery systems are drawn.

Keywords: range extension, solid-fuel ramjet engine, artillery, foreign military.

Введение

Вслед за растущими дальностями боевого взаимодействия сухопутных войск в современных вооруженных конфликтах, зарубежные ученые и инженеры активно прорабатывают различ-

ные варианты повышения дальности стрельбы ствольной артиллерии. Одним из направлений, активизация интереса к которому отмечается в последнее время, являются изыскания в области активно-реактивных снарядов (АРС), оснащенных прямоточным воздушно-реактивным

двигателем (ПВРД) на твердом топливе (ТТ). При этом работы ведутся как в развитых странах, так и в государствах, традиционно относимых к развивающимся.

При этом активное распространение зарубежными странами различных систем тяжелого вооружения, в том числе артиллерии, несет высокий риск попадания таких систем в руки вооруженных формирований, склонных к совершению террористических актов. В условиях такого использования артиллерии одним из основных средств противодействия становится контрбатарейная борьба, которая должна вестись артсистемами, имеющими преимущество в дальности стрельбы.

Для создания ориентиров при формировании отечественного научно-технического задела в области дальнобойного оружия необходимо иметь представление о результатах, достигнутых или ожидаемых зарубежными разработчиками. Целью настоящей работы является в сокращенном виде представить имеющиеся в открытом доступе материалы по АРС с ПВРД, создаваемым в обеспечение увеличения дальности стрельбы ствольной артиллерии. При этом проводится анализ для выявления возможных проблем на пути адаптации таких АРС к использованию в артиллерии НАТО и формируются предположения о характеристиках и конструкции снаряда, который может появиться на вооружении иностранных государств в ближайшее время.

Основная часть

Одним из наиболее успешных в плане экспериментально-теоретической отработки об-

разцов является южноафриканский 155-мм снаряд Pro-RAM. Работы над ним ведутся с рубежа 1990-х и 2000-х годов [1, 2], в том числе при участии США [3].

В открытом доступе не обнаружено иллюстраций Pro-RAM в виде разрезного макета, демонстрирующих его внутреннее устройство. По имеющимся изображениям образца «в металле» можно лишь сделать вывод о том, что его длина соответствует длине штатного снаряда для артсистемы G-6, и он оснащен осесимметричным головным воздухозаборным устройством (ВЗУ). Какие-либо выводы о конструктивной схеме Pro-RAM основываются на иллюстрациях компьютерных моделей, представленных разработчиками [3, 4]. Заявлены как минимум два разных варианта с одной общей конструктивной схемой. Первый (рис. 1, а) предусматривает размещение разрывного заряда (РЗ) в массивном центральном теле (ЦТ), также содержащем небольшой заряд ТТ в газогенераторе — вероятно, как сопроводитель горения и/или для обеспечения эжекционного эффекта. Основной заряд ТТ расположен в камере сгорания ПВРД по «открытой» схеме, т.е. непосредственно обдувается поступающим в камеру рабочим телом. Второй вариант (рис. 1, б) обладает ЦТ, содержащим только профилированный конус ВЗУ, а РЗ размещен в виде трубки вокруг тракта двигателя.

Расчетно-графическая оценка объема боевой части демонстрируемых вариантов Pro-RAM показала, что при плотности наполнителя 1700 кг/м^3 первый вариант имеет массу РЗ порядка 5,13 кг, а второй вариант — порядка 5,6 кг. Эти значения на 12...30 % превышают массу РЗ дальнобойного АРС типа M2005 HE-VLAP, который не оснащен ПВРД.



а



б

Рис. 1. Конструктивные схемы снаряда Pro-RAM, представленные в [3, 4]

Тем не менее такая конструктивная схема снаряда, как на Pro-RAM, имеет ряд проблемных нюансов, от преодоления которых зависит эффективность АРС в целом. Во-первых, наличие осесимметричного головного ВЗУ делает невозможным применение головных взрывателей, к которым относится как большинство штатных взрывателей, так и перспективные устройства с неконтактным подрывом. Внешние обводы взрывателя не позволяют обеспечить подачу воздуха в тракт ПВРД с настолько высокими значениями полного давления, как при использовании специально спроектированного ступенчатого конуса, который изображен на Pro-RAM. С другой стороны, размещение над взрывателем дополнительного обтекателя, обеспечивающего наиболее выгодную работу ПВРД, затрудняет ввод установок взрывателя и неконтактный подрыв снаряда.

Во-вторых, интеграция тракта ПВРД в снаряде так, как показано на рис. 1, приводит к менее рациональным конструктивным решениям по боевой части, чем на АРС, у которых она расположена тандемно относительно двигателя. В случае схемы на рис. 1, а заряду требуется раздробить не только собственную оболочку, но и обечайку ПВРД, которая из условий прочности должна быть достаточно толстой, особенно в сечениях ниже пилонов, на которых закреплено ЦТ. Такие условия функционирования вызывают потери энергии ударной волны и снижение скорости разлета осколков. В случае схемы на рис. 1, б необходима достаточно сложная система инициирования кольцевого РЗ. Кроме того, при этом часть энергии взрыва будет затрачена на «схлопывание» оболочки боевой части в свободное пространство, образованное трактом ПВРД, а не на разброс осколков.

В 2017 году разработчиками этого снаряда были представлены результаты стрельбовых испытаний в виде графиков скорости АРС, измеренных радиолокационной станцией [4]. Стрельбы проводились из 155-мм самоходной установки G-6 и подтвердили работоспособность схемы — ПВРД позволил снаряду набрать скорость с 900...930 м/с до 920...960 м/с в течение 8 секунд работы. Время работы двигателя по данным стрельбовых испытаний составило ~50 % от теоретического, представленного на графике скорости в [4]. Дальность по-

лета при условии следования теоретическому профилю скорости, согласно расчетам авторов статьи, составляет 70 км, что хорошо согласуется с характеристиками, заявленными разработчиком ранее [3]. Тем не менее данные стрельбовых испытаний показывают, что достижение этого рубежа трудновыполнимо на уровне функционирования снаряда, представленном в [4]. Это связано с временем работы ПВРД существенно меньше расчетного. При этом большую часть траектории занимает пассивный участок, на котором снаряд должен терять скорость существенно быстрее, чем штатный образец, за счет гидравлического сопротивления тракта работающего ПВРД.

Необходимо отметить, что стрельбовым испытаниям Pro-RAM предшествовала обширная стендовая и расчетно-теоретическая отработка: испытания ВЗУ в аэродинамической трубе, стрельбовые испытания макетов в целях проверки прочности конструкции и топливного заряда, математическое моделирование рабочих процессов в ПВРД и напряженно-деформированного состояния конструкции АРС при выстреле [1, 2, 4]. Несмотря, по-видимому, на большой объем теоретических данных, разработчики Pro-RAM строго придерживаются схемы с головным ВЗУ и трактом ПВРД, проходящим насквозь через весь снаряд.

Детальной информации о Pro-RAM с 2017 года по настоящее время в открытых источниках не обнаружено, однако весьма вероятно, что, с учетом кооперации фирмы-разработчика с США, научно-технический задел по этому снаряду был использован при создании американского АРС с ПВРД XM1155, работы по которому стартовали, предположительно, в середине-конце 2010-х годов.

Вероятно, на «волне успеха» Pro-RAM начались работы по аналогичному снаряду фирмой Roongsan в Южной Корее. Известная фотография разрезного макета, представленного на выставке в 2016 году [5], дает представление о конструкции этого АРС (рис. 2).

Обращает на себя внимание использование южнокорейскими конструкторами схемы, представляющей собой адаптацию «классического» ПВРД с открытым расположением топливного заряда применительно к АРС. В этой схеме боевая часть размещена в ЦТ, тракт двигателя



Рис. 2. Снаряд фирмы Poongsan [5]

проходит через снаряд насквозь, и используется осесимметричное головное ВЗУ.

Недостатки у этого снаряда те же, что и у Pro-RAM: затруднено использование штатных головных взрывателей; повышено аэродинамическое сопротивление на пассивном участке траектории; понижен поражающий эффект боевой части за счет необходимости разрушения толстой обечайки ПВРД. Расчетно-графический анализ снаряда, представленного на рис. 2, показал, что при плотности наполнителя 1700 кг/м^3 масса его РЗ составляет порядка 2,3 кг.

Имеющиеся научные публикации корейских авторов по снаряду со схемой, близкой к изображенной на рис. 2, показывают, что предварительно проводилась достаточно серьезная расчетно-теоретическая проработка в обоснование параметров будущего АРС, однако без варьирования схемы адаптации ПВРД к снаряду [6, 7]. Вероятно, экспериментальная отработка этого АРС является успешной, поскольку в зарубежных источниках по состоянию на 2023 год имеются заявления о скором начале серийного производства таких снарядов. Заявлено, что при стрельбе из 155-мм системы К-9 дальность полета составляет 60 км [8]. Учитывая, что К-9 соответствует требованиям совместного меморандума о взаимопонимании в области баллистики (JВMoU) стран НАТО, начальная скорость этого АРС при массе, близкой к штатному снаряду, составит порядка 945 м/с.

В Индии была проведена достаточно детальная научно-конструкторская проработка АРС с ПВРД [9–11]. Следует отметить, что и в этом случае рассматривается только схема с боевой частью в ЦТ и осесимметричным головным ВЗУ. Особенностью этих изысканий является ориентация на реализацию т.н. «псевдовакуумной» траектории, при которой тяга ПВРД всегда рав-

няется силе лобового сопротивления. Эта идея применительно к АРС ранее рассматривалась советскими и американскими учеными, в ходе чего была показана возможность не только увеличения дальности стрельбы, но и повышения кучности за счет парирования воздействия ветра. Кроме того, такая траектория является наиболее предсказуемой и легче всего рассчитывается при баллистических вычислениях при подготовке к стрельбе.

Равенство тяги ПВРД силе лобового сопротивления достигается за счет регулирования притока воздуха к открыто расположенному в камере сгорания заряду топлива [11]. Вероятно, что использование осесимметричного головного ВЗУ вызвано необходимостью применить специфическую систему регулирования, способную выдержать осевые перегрузки при выстреле.

В материалах конструкторской проработки индийского АРС с ПВРД калибром 155 мм указывается масса полезной нагрузки в 7 кг. Не сообщается, какая доля полезной нагрузки приходится на РЗ. При этом длина АРС даже без учета длины заряда топлива составляет 1,13 м, что уже превышает типичное для 155-мм систем ограничение на максимальную длину снаряда в 1,0 м [9](рис. 3). Такое решение усложняет как процесс заряжания снаряда, так и размещение дальнобойного метательного заряда в камере орудия совместно с длинной запоясковой частью снаряда.

Масса ЦТ составляет порядка 40 % от массы всего снаряда [10], что неизбежно приведет к необходимости усиления пилонов ЦТ и обечайки ПВРД с увеличением их собственной массы. В противном случае существенно ограничивается допустимое давление на дно снаряда и как следствие — начальная скорость АРС.

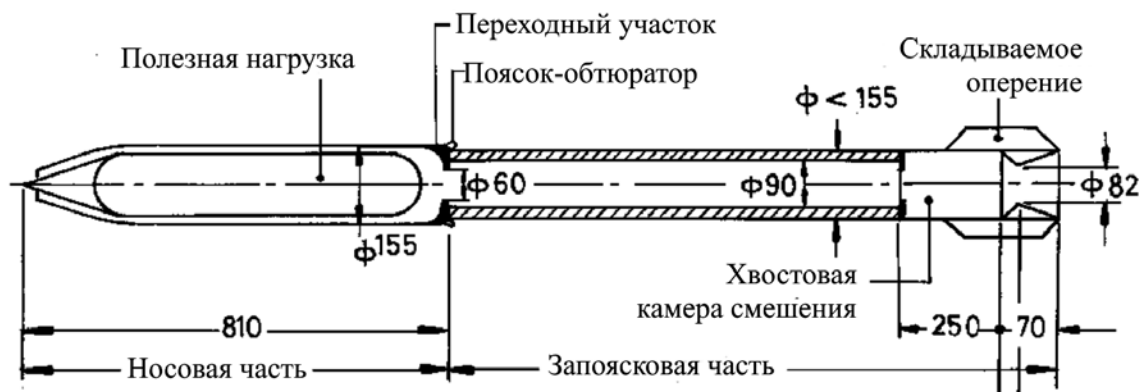


Рис. 3. Схема индийского 155-мм АРС с ПВРД, реализующего «псевдовакуумную» траекторию [9–11].
Перевод подписей выполнен авторами статьи. Размеры в миллиметрах

Индийскими специалистами приводится оценка дальности 155-мм АРС с ПВРД, реализующего «псевдовакуумную» траекторию — порядка 45 км при начальной скорости до 897 м/с [9]. Задел, представленный в работах [9–11], создан в начале 2000-х годов. Вероятно, он мог быть в дальнейшем использован инженерами других стран, в частности США. Однако вместе с широким распространением коммерческих пакетов для численного моделирования, например фирмы ANSYS Inc., интерес к таким АРС в Индии возвращается [12].

Начиная с 2020 года в средствах массовой информации периодически появляются сведения о новом сверхдальнобойном снаряде совместной разработки США и Норвегии под индексом XM1155. Указывается на обширную стендовую отработку, в т.ч. испытания твердотопливного ПВРД на присоединенном воздухопроводе [13]. В 2023 году объявлено об успешных стрельбовых испытаниях этого АРС, однако достигнутая дальность полета не разглашается [14]. Согласно ряду публикаций, расчетная максимальная дальность полета XM1155 должна составлять от 100 км [15] до 150 км [16]. Также не обнаружено и иллюстраций, показывающих схематическое внутреннее устройство снаряда. Публике были представлены только макетные образцы, имеющие вид, как на рис. 4.

Из имеющихся материалов по XM1155 можно сделать вывод, что он также обладает «концентрической» схемой взаимного расположения полезной нагрузки и ПВРД, при которой тракт двигателя проходит насквозь через весь АРС. Соответственно, ему присущи те же недостатки,

что были отмечены выше для других иностранных снарядов. Этот образец интересен в первую очередь чрезвычайно высокими значениями дальности полета для 155-мм образца.

Ближайшие к заявленным для XM1155 показатели дальности стрельбы в этом калибре были получены на американском снаряде LRLAP, обладавшем массивным ракетным двигателем на твердом топливе и имевшем удлинение примерно в 2 раза больше, чем XM1155. Наибольшую часть пути на максимальную дальность порядка 120 км LRLAP преодолевал на пассивном участке траектории в режиме планирования, чему способствовали развитые аэродинамические поверхности. С другой стороны, судя по рис. 4, XM1155 не обладает столь же высоким аэродинамическим качеством, что и LRLAP. Поэтому можно предположить, что максимальная дальность его полета обеспечивается практически исключительно за счет двигателя, а рулевые поверхности служат для коррекции траектории в обеспечение повышения кучности и точности стрельбы.

На основании анализа других зарубежных АРС с ПВРД можно сделать вывод, что такой двигатель может работать либо как на снаряде Pro-RAM (разгон на восходящей ветви баллистической траектории), либо как на «индийском» снаряде (работа на протяжении всего времени полета в обеспечение «псевдовакуумной» траектории). Второй вариант, очевидно, предпочтительнее, т.к. в нем отсутствует пассивный участок, на котором будет действовать повышенное гидравлическое сопротивление тракта ПВРД. Это сопротивление можно



Рис. 4. Снаряд с ПВРД совместной разработки компаний Boeing (США) и Nammo (Норвегия)

нивелировать лишь достаточно экзотическими мерами, например при помощи смещения ЦТ вперед с перекрытием тракта после окончания работы ПВРД, как показано во французском патенте [17].

Проведенные авторами статьи расчеты «псевдовакуумной» траектории показали, что для достижения по ней дальности в 100...150 км потребуется начальная скорость АРС 990...1215 м/с соответственно. Такие значения представляются достижимыми, с учетом того, что ХМ1155 разрабатывается для применения из новой американской артсистемы М1299 ERCA с длиной ствола 58 калибров и камерой увеличенного объема.

Результаты анализа сведены в таблицу. При оценке возможностей зарубежных АРС с ПВРД необходимо учитывать и артиллерийский комплекс, из которого они применяются, и возможности по адаптации этих АРС к другим комплексам — в частности, соответствующим требованиям JBMoU.

Из представленного следует, что широкого распространения в странах НАТО следует ожидать от снарядов типа Pro-RAM и корейского АРС фирмы Poongsan. Вариант, представленный индийскими специалистами, обладает слишком длинной запоясковой частью, делающей невозможной его применение из орудий с метательными зарядами, соответствующими JBMoU. Снаряд ХМ1155 также требует специальных дальнобойных метательных зарядов, разработанных именно для артсистемы М1299, улучшенные баллистические характеристики которой и обеспечивают максимальную дальность стрельбы этим снарядом.

Снаряд Pro-RAM и снаряд Poongsan не обладают устройствами для коррекции траектории, а применение взрывателей типа М1156 РГК сопряжено с нарушением геометрии ВЗУ и расчетной работы ПВРД. Применение штатных головных взрывателей само по себе затруднено на зарубежных снарядах с ПВРД в силу выбранной конструктивной схемы АРС, при которой тракт двигателя проходит насквозь через весь снаряд, полезная нагрузка размещается в ЦТ или вокруг тракта, а двигатель оснащается осесимметричным головным ВЗУ. При этом РЗ либо должен обладать сложной системой инициирования (при размещении вокруг тракта ПВРД), либо при подрыве должен раздробить не только стенку боевой части, но и стенку ПВРД, толщина которой обусловлена требованиями прочности при выстреле. Сама масса РЗ находится на уровне, примерно соответствующем дальнобойным АРС без ПВРД (Pro-RAM) или существенно ниже его (снаряд Poongsan).

Все перечисленные факторы вкупе с ожидаемо большим рассеиванием на максимальной дальности стрельбы снижают эффективность боевого действия таких снарядов. Так, при величине $B_d = 1/200$ на дальности 70 км длина полуоси эллипса рассеивания по дальности составит 1,4 км. Поэтому нельзя исключать адаптацию управляемого снаряда ХМ1155 под стрельбу на дальности 60...70 км из орудий, соответствующих JBMoU. Это позволит компенсировать малую массу РЗ и неоптимальные условия его подрыва путем радикального снижения кругового вероятного отклонения точек попадания за счет воздействия на снаряд аэродинамических рулей.

Основные характеристики современных дальнебойных АРС с ПВРД зарубежных стран

Условное обозначение	Pro-RAM	АРС фирмы Poongsan	«Индийский» АРС с ПВРД	ХМ1155
Калибр, мм	155	155	155	155
Масса РЗ, кг	≈(5,13...5,6)*	≈2,3*	≤ 7,0	Неизвестна
Начальная скорость, м/с	900**	945*	897**	990...1215*
Максимальная дальность полета, км	70,0**	60,0**	45,0**	100,0...150,0**
Длина снаряда, м	< 1,0*	< 1,0*	≥ 1,5**	< 1,0*
Артсистема	G-6	K-9	Неизвестна	M1299
Возможность стрельбы на заявленную дальность из артсистем НАТО, соответствующих JВМoU	+	+	—	—
Возможность управления траекторией полета	—	—	+	+

* — расчетная оценка авторов статьи; ** — расчетная оценка разработчиков

Выводы

Для наиболее распространенных арт-комплексов стран НАТО, соответствующих JВМoU, можно ожидать появление АРС с ПВРД, по конструктивной схеме близкого к Pro-RAM, и оснащенного аэродинамическими рулями для коррекции траектории, аналогично ХМ1155. Его дальность полета составит порядка 60...70 км, что представляется достижимым по результатам отработки Pro-RAM. При этом масса РЗ будет составлять менее 5,6 кг при плотности наполнителя 1700 кг/м³, так как часть объема ЦТ будет занята блоком системы управления.

Необходимо отметить ориентацию зарубежных специалистов практически только на одну конструктивную схему АРС с ПВРД, в которой двигателю отводится первоочередная роль, зачастую в ущерб остальным элементам снаряда. Вероятно, это связано с желанием получить наилучшие баллистические характеристики двигателя. Также вероятно, что материалы по столь же глубокой научно-технической проработке иных конструктивных схем не попадают в открытые зарубежные источники.

Литература

1. Oosthuizen R.R., du Buisson J.J., Botha G.F. Solid Fuel Ramjet (SFRJ) Propulsion for Artillery Projectile Applications — Concept Development

Overview // 19th International Symposium of Ballistics (Interlaken, 7–11 May 2001). Thun, 2001. Pp. 403–410.

2. Dionisio F., Stockenström A. Aerodynamic wind-tunnel test of a ramjet projectile // 19th International Symposium of Ballistics (Interlaken, 7–11 May 2001). Thun, 2001. Pp. 529–536.

3. Gyff Fitchat. South African/US Cooperative Developments // International Armaments Technology Symposium & Exhibition (Wharton, 14–16 June 2004). URL: <https://ndia.dtic.mil/2004/2004armaments.html> (дата обращения: 17.02.2020).

4. Roelof Oosthuizen, Andrew Whittaker. Artillery Ammunition. Answering topical questions // PARARI 2017: Australian Explosive Ordnance Safety Symposium (Canberra, 20–23 November 2017). URL: <https://www.defenceconnect.com.au/events/item/parari-2017-australian-explosive-ordnance-safety-symposium> (Доступ с VPN; дата обращения: 17.02.2020).

5. Poongsan debuts 155 mm ramjet propelled artillery shell concept [Электронный ресурс] // Defence & Security Intelligence & Analysis | Jane's 360: сайт. URL: <http://www.janes.com/article/63602/dx-korea-2016-poongsan-debuts-155-mm-ramjet-propelled-artillery-shell-concept> (дата обращения: 17.02.2020).

6. Kang, Shinjae. Design of Gun Launched Ramjet Propelled Artillery Shell with Inviscid Flow Assumption / Shinjae Kang, Chul Park, Woosuk Jung, Taesoo Kwon, Juhyeon Park, Sejin Kwon //

Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers. 2015. Vol. 19. No. 4. Pp. 52–60.

7. Range Extension Form Ramjet Propelled Shell: pat. KR101609507B1 South Korea: IPC F42B 10/38, F02K 7/10, F42B 10/34. KR1020150029062A; filed 02.03.2015; publ. 05.04.2016.

8. Inder Singh Bisht. S. Korean Firm Announces 155mm Extended-Range Shell for K9 Howitzer [Электронный ресурс] // The Defence Post : сайт. — URL: <https://www.thedefensepost.com/2023/08/31/korean-155mm-shell-k9/> (дата обращения: 18.10.2023).

9. Krishnan, Subramaniam. Solid Fuel Ramjet Combustor Design / Subramaniam Krishnan, Philmon George // Progress in Aerospace Sciences. 1998. Vol. 34. Pp. 219–256.

10. Subramaniam Krishnan. Solid-Fuel Ramjet Assisted Gun-Launched Projectiles: An Overview // Proceedings of Fifth National Conference on Airbreathing and Aerospace Propulsion (Hyderabad, 21–23 December 2000). Bangalore, 2000. Pp. 52–64.

11. Krishnan, Subramaniam. Design and Control of Solid-Fuel Ramjet for Pseudovacuum Trajectories / Subramaniam Krishnan, Philmon George, S. Sathyan // Journal of Propulsion and Power. 2000. Vol. 16. No. 5. Pp. 815–822.

12. Dillion, Swaranjeet Singh. Design and Computational Analysis of Inlet Cone Section of Artillery Ramjet / Swaranjeet Singh Dillion, Kunika Band, Sandip Vishwakarma, Manav Katyal // Journal of Emerging Technologies and

Innovative Research. April, 2021. Vol. 8. Issue 4. Pp. 535–543.

13. Ben Sampson. Northrup Grumman completes solid fuel ramjet testing for artillery [Электронный ресурс] // Aerospace Testing International : сайт. URL: <https://www.aerospacetestinginternational.com/news/weapons-testing/northrup-grumman-completes-solid-fuel-ramjet-testing-for-artillery.html> (дата обращения: 17.02.2021).

14. Dan Schere. Army conducts indirect-fire test of Boeing-Nammo projectile [Электронный ресурс] // Inside Defence : сайт. — URL: <https://insidedefense.com/insider/army-conducts-indirect-fire-test-boeing-nammo-projectile> (дата обращения: 19.10.2023).

15. Joseph Trevithick. Raytheon Is Developing A Ramjet Artillery Round For The Army's New Super Howitzers [Электронный ресурс] // The Drive : сайт. — URL: <https://www.thedrive.com/the-war-zone/33425/raytheon-is-developing-a-ramjet-artillery-round-for-the-armys-new-super-howitzers> (дата обращения: 19.10.2023).

16. Joseph Trevithick. This Is A Ramjet Artillery Shell Right As It's Fired Out Of A Howitzer [Электронный ресурс] // The Drive: сайт. — URL: <https://www.thedrive.com/the-war-zone/this-is-a-ramjet-artillery-shell-right-as-its-fired-out-of-a-howitzer> (дата обращения: 19.10.2023).

17. Projectile Propulsé Par Statoréacteur : pat. International: IPC F02K 7/18, F42B 10/40, F02K 9/18, F42B 10/64 / Christian Trouillot; Applicant/ Owner: Cabinet Chaillot. №19/053475; filed 29.04.2019; publ. 07.11.2019.