

## БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНО-РЕАКТИВНЫХ СНАРЯДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАДЕЖНОСТЬ ИХ МАРШЕВЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Д.П.АЛЕКСАНДРОВ, В.Ф. ЗАХАРЕНКОВ\*

СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия

\* БГТУ "ВОЕНМЕХ", Санкт-Петербург, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Изложен машинный эксперимент по изучению влияния механических характеристик твердого топлива и материалов корпусов маршевых ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) при замене металлических корпусов на стеклопластиковые и боралюмоуглепластиковые на боевую эффективность активно-реактивных снарядов (АРС) и надежность их функционирования. Даны статистический анализ работоспособности РДТТ и рекомендации по повышению технических характеристик изделий.

Активно-реактивный снаряд (АРС) как техногенная система по принципу действия представляет собой систему, в которой сначала имеет место активное движение снаряда и затем - активно-реактивное (рис. 1).

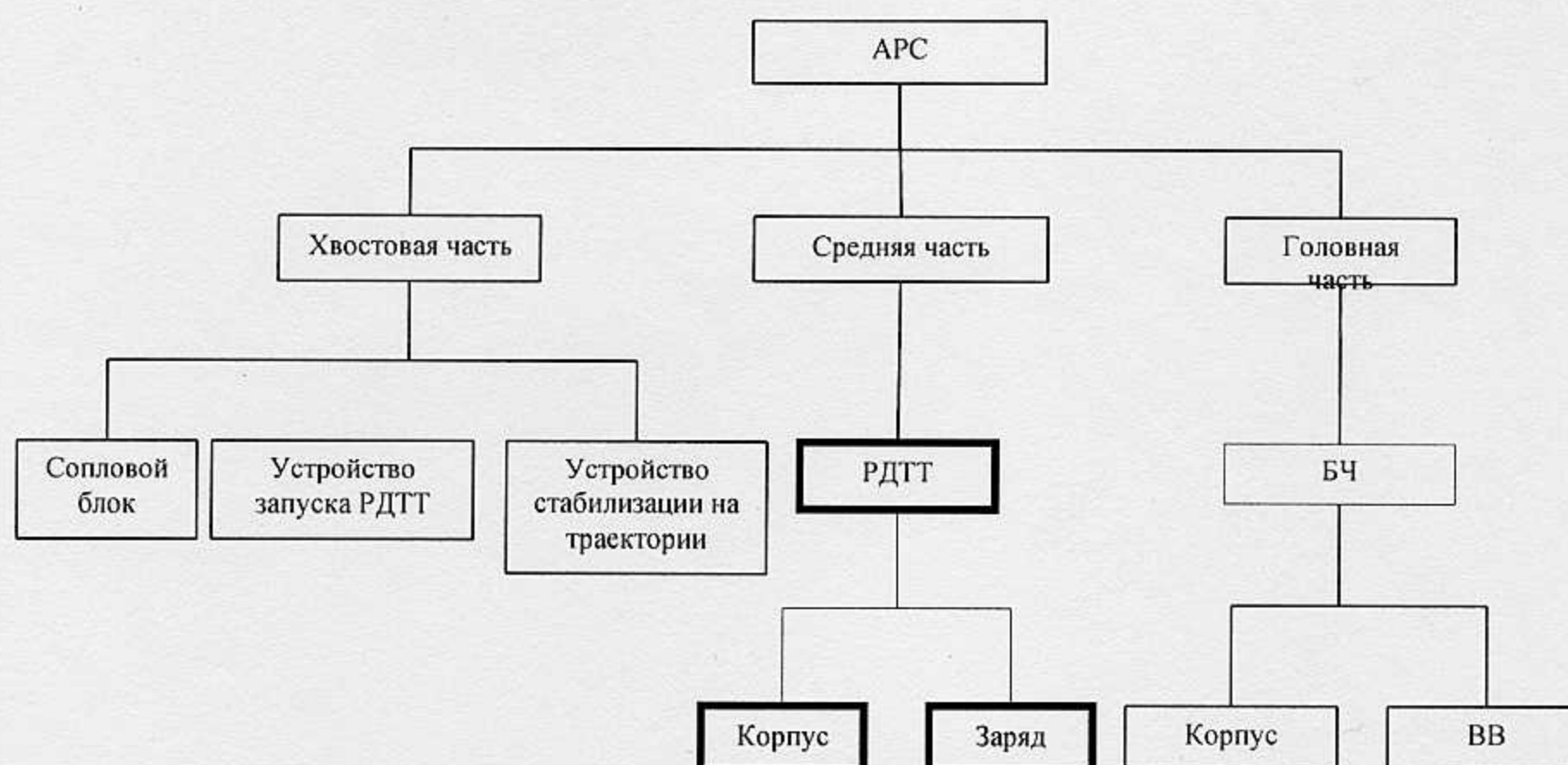


Рис. 1. Декомпозиция системы АРС



Информационные данные о процессе отработки АРС калибра 152 и 202 мм с металлическими корпусами свидетельствуют о наличии 3-5% отказов при проведении натурных испытаний, проявляющихся в виде уменьшения дальности полета снаряда на 10-12% или повреждений корпуса двигателя при движении на активном участке траектории.

Анализ многоуровневой иерархической системы АРС (рис.1), показывает, что основная причина указанных отказов – потеря работоспособности его командного элемента – маршевого ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ).

В процессе эксплуатации конструкция РДТТ испытывает динамические нагрузки как система с распределенными массами, обладающая реологическими деформационными и прочностными характеристиками. При этом экстремальные нагрузки возникают при переходных режимах работы: стартовых перегрузках в период активного движения АРС, воспламенении твердого топлива (ТТ), выходе РДТТ на режим и т.п., т.е. в периоды когда порядок эксплуатационных нагрузок определяется силами инерции. Колебательные процессы в двигателе, о чем свидетельствуют исследования внутрикамерных (внутри корпуса РДТТ) явлений, изменяют характер физических процессов горения ТТ.

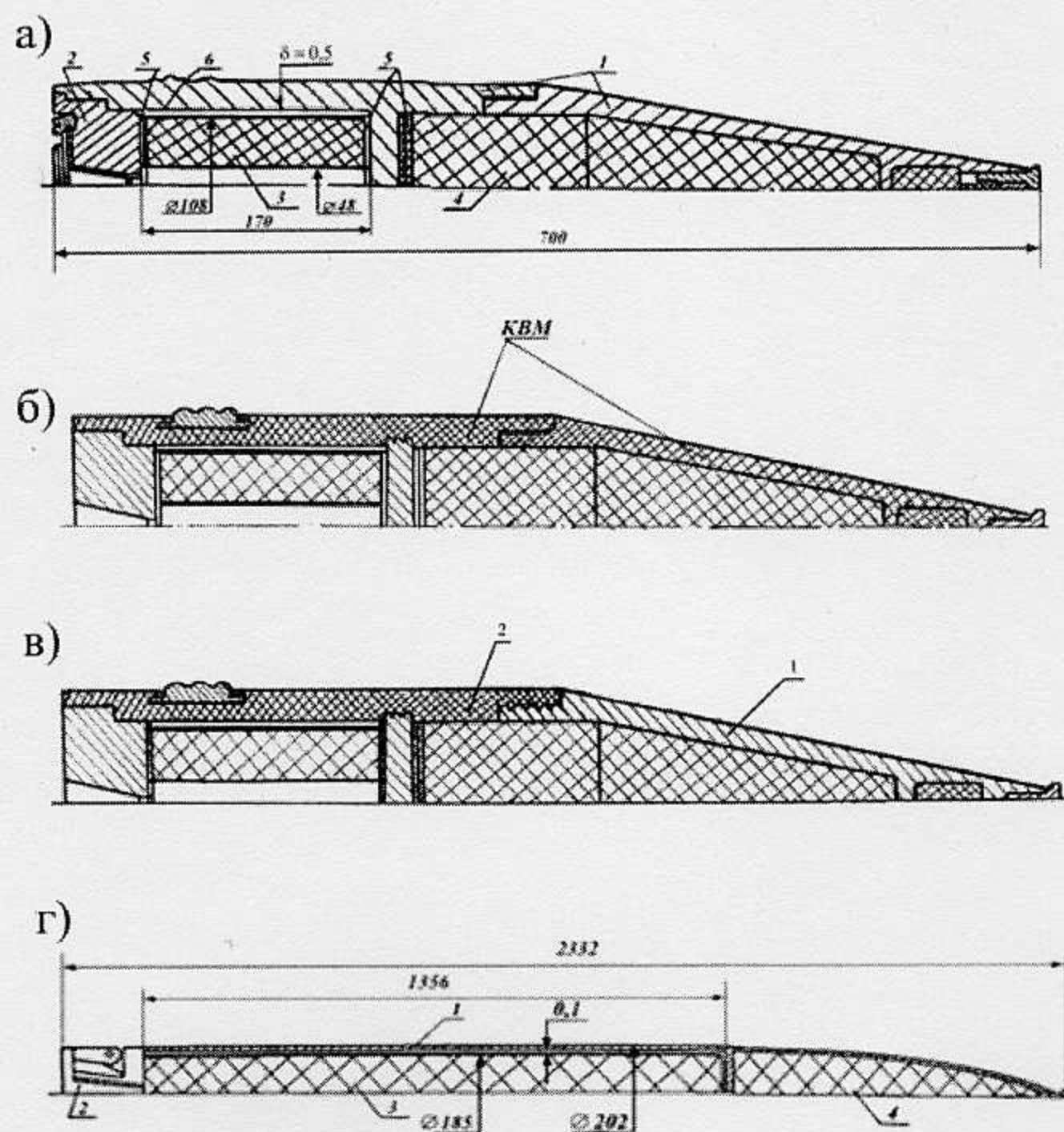
Таким образом, можно предполагать, что потеря работоспособности двигателя связана с механической повреждаемостью, накапливаемой в его элементах при переходных режимах эксплуатации и обусловлена динамическим характером нагружения.

Механические повреждения в заряде ТТ приводят к аномалии его горения и, как следствие, к изменению вектора тяги, времени работы РДТТ и дальности полета АРС, а также к изменению характера физических процессов, приводящих к детонации топлива и разрушению корпуса АРС.

Правомерность сделанных предположений подтверждается анализом прочности РДТТ при переходных режимах эксплуатации, а именно, на периоде активного движения АРС, где имеют место указанные отказы[1]. На рис. 2 представлены конструктивные схемы АРС калибра 152 и 202мм.

Для указанных типов снарядов было выполнено исследование влияния механических характеристик ТТ и материалов корпусов АРС на прочность РДТТ [2], эксплуатационную надежность и боевую эффективность АРС. Оценка последних проводилась по дальности метания и дульной скорости, получаемых при использовании штатного "вышибного" заряда (без учета работы РДТТ). При этом определялась вероятность безотказной работы РДТТ  $p(\sigma^{(m)}_{i_{\max}} \leq [\sigma]^{(m)}_c)$ , где  $\sigma^{(m)}_{i_{\max}} \leq [\sigma]^{(m)}_c$  – условие работоспособности двигателя;  $\sigma^{(m)}_{i_{\max}}$  – максимальная интенсивность динамических напряжений в заряде ТТ;  $[\sigma]^{(m)}_c$  – допускаемое напряжение при сжатии ТТ.





**Рис. 2.** Конструктивные схемы и варианты исполнения корпусов АРС калибра 152мм (а, б, в) и 202мм (г)

а – АРС со стальным корпусом: 1-корпус, 2- сопловой блок, 3-ракетный двигатель, 4 -боевая часть, 5,6-прокладки; б – АРС с корпусом из композиционно-волокнуистого материала (КВМ); в – АРС с составным по длине корпусом: 1-металл, 2-КВМ; г – калибр 202 мм: 1 -корпус, 2- сопловой блок, 3- ракетный двигатель, 4-боевая

В качестве материалов корпусов рассматривались сталь, стеклопластик и боралюмоуглепластик (табл.1). Критерием выбора КВМ для изготовления корпуса служила длина снаряда: 4,6 калибра у 152мм АРС и 11,5 калибра у 202мм АРС. При этом для изготовления корпусов АРС калибра 152мм рассматривалось применение стеклопластика продольно-поперечного армирования (ППН 1:1) на основе волокна ВМ-1 и связующего ЭХД, технологичного и сравнительно недорогого в изготовлении, имеющего достаточно высокие удельную прочность и жесткость.



Таблица 1. Механические характеристики материалов корпуса и двигателя АРС

| Материал  |                     | Сталь | Твердое топливо |              | Стекло-<br>пластик<br>ППН 1:1 | Боралюмо-<br>углепла-<br>стик<br>ППН 1:2 |
|---|---------------------|-------|-----------------|--------------|-------------------------------|--|
|   |                     |       | АРС<br>152мм    | АРС<br>202мм |                               |  |
| Модуль<br>нормальной<br>упругости $E$ ,<br>$\times 10^{-2}$ МПа       | $E_\theta$          | 2108  | 6,25            | 3,16         | 450                           | 910                                      |
|   | $E_r$               |       |                 |              | 220                           |  |
|   | $E_x$               |       |                 |              | 215                           | 420                                      |
| Коэффициент<br>Пуассона $\mu$   | $\mu_{r\theta}$     | 0,31  | 0,47            | 0,49         | 0,24                          | 0,16                                     |
|   | $\mu_{\theta r}$    |       |                 |              | 0,21                          | 0,16                                     |
|   | $\mu_{x\theta}$     |       |                 |              | 0,22                          | 0,14                                     |
|   | $\mu_{\theta x}$    |       |                 |              | 0,16                          | 0,18                                     |
|   | $\mu_{rx}$          |       |                 |              | 0,14                          | 0,21                                     |
|   | $\mu_{xr}$          |       |                 |              | 0,13                          | 0,21                                     |
| Допускаемое<br>напряжение<br>$[\sigma]_c^p$ ,<br>$\times 10^{-2}$ МПа | $[\sigma_\theta]_p$ | 5,7   | 0,25            | 0,19         | 145                           | 9  |
|   | $[\sigma_r]_p$      |       |                 |              | 7,65                          | 6  |
|   | $[\sigma_x]_p$      |       |                 |              | 4,5                           | 4  |
| Объемный<br>вес $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>                          | $\gamma$            | 78,2  | 16,2            | 17,5         | 18,5                          | 21                                       |

Здесь  $E$ ,  $\mu$  – модуль нормальной упругости и коэффициент Пуассона, соответственно, изотропных материалов (корпуса, ТТ);  $E_\theta, E_r, E_x, \mu_{r\theta}, \mu_{\theta r}, \mu_{x\theta}, \mu_{\theta x}, \mu_{rx}, \mu_{xr}$ ;  $[\sigma_\theta]_p, [\sigma_r]_p, [\sigma_x]_p$  – модули нормальной упругости, коэффициенты Пуассона и пределы прочности при растяжении в тангенциальном  $\theta$ , радиальном  $r$  и осевом  $x$  направлениях, соответственно, материала корпуса АРС калибра 202мм (боралюмоуглепластика).

Для изготовления корпусов АРС калибра 202 мм, имеющих длину в 2,5 раза выше чем 152 мм АРС и вследствие этого обладающего пониженной изгибной жесткостью, влияющей на точность поражения цели, рассматривалось применение боралюмоуглепластика (ППН 1:2), в котором для продольного армирования используется бора-

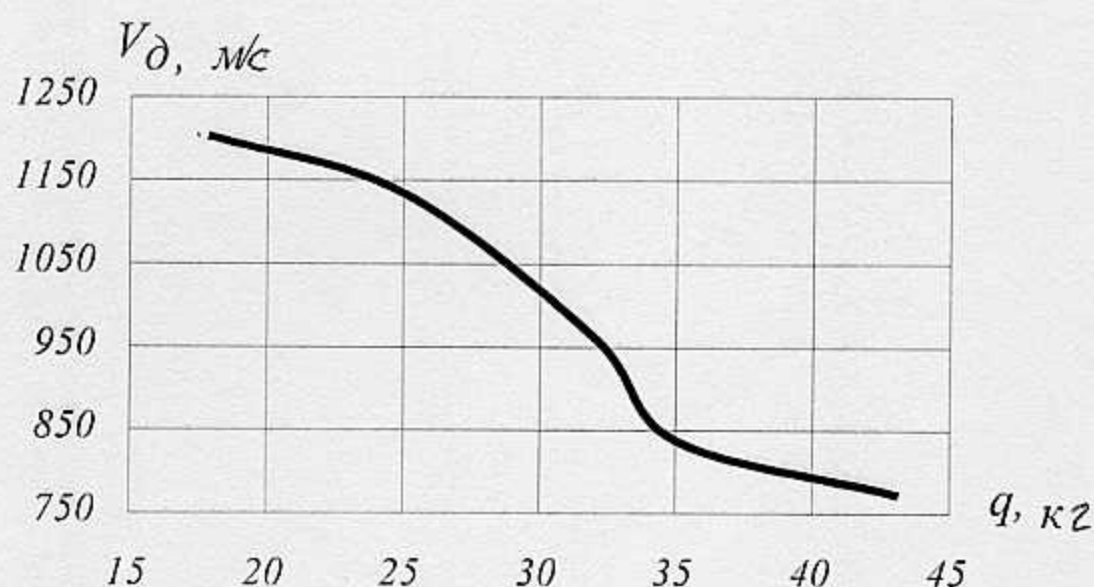


люминиевый полуфабрикат, [3], а поперечное армирование осуществляется углеродным волокном ВМН-4. Такой материал практически не уступает стеклопластику по удельной прочности, но значительно превосходит его по удельной изгибной жесткости.

Применение указанного композиционно-волокнутого материала при изготовлении несущего кожуха опытного ствола 30мм артиллерийского автомата позволило повысить технические характеристики ствола, влияющие на точность стрельбы, что подтверждено результатами стендовых и полигонных испытаний [4].

Из рис.3 видно, что кривая  $\Delta S - \Delta q$  имеет экстремум, что позволяет сделать предположение о существовании оптимальной массы ( $q = 32\text{кг}$ ), обеспечивающей максимальное увеличение дальности метания АРС калибра 152мм на 12,1% (опытный 2-рис.2в, табл.2) вследствие частичной замены стального корпуса штатного снаряда стеклопластиковым (табл.1, рис.2в). В то же время указанный вариант исполнения обеспечивает значительное увеличение  $\Delta V_d, \%$  (на 24,9%), что значительно увеличивает могущество боеприпаса и его боевую эффективность артиллерийского и ракетного оружия.

Полная замена металла в корпусе на стеклопластик (опытный 1 – рис.2б) приводит к значительному снижению массы  $\Delta q, \% = 58,1\%$  и увеличению дульной скорости  $\Delta V_d, \% = 56,1\%$  снаряда. Однако, имеющее место снижение инерционности АРС, обладающих малой массой, вследствие расходования кинетической энергии на преодоление сил сопротивления, сокращает дальность метания ( $\Delta S_{мет}, \% = 26,4\%$ ). В то же время, применение АРС с указанным корпусом может оказаться эффективным при стрельбе на малые расстояния, т.к. высокая дульная (начальная) скорость способствует высокой пробиваемости цели.



**Рис .3.** Зависимость изменения дальности метания  $\Delta S_{мет}$  от изменения  $\Delta q$  массы АРС



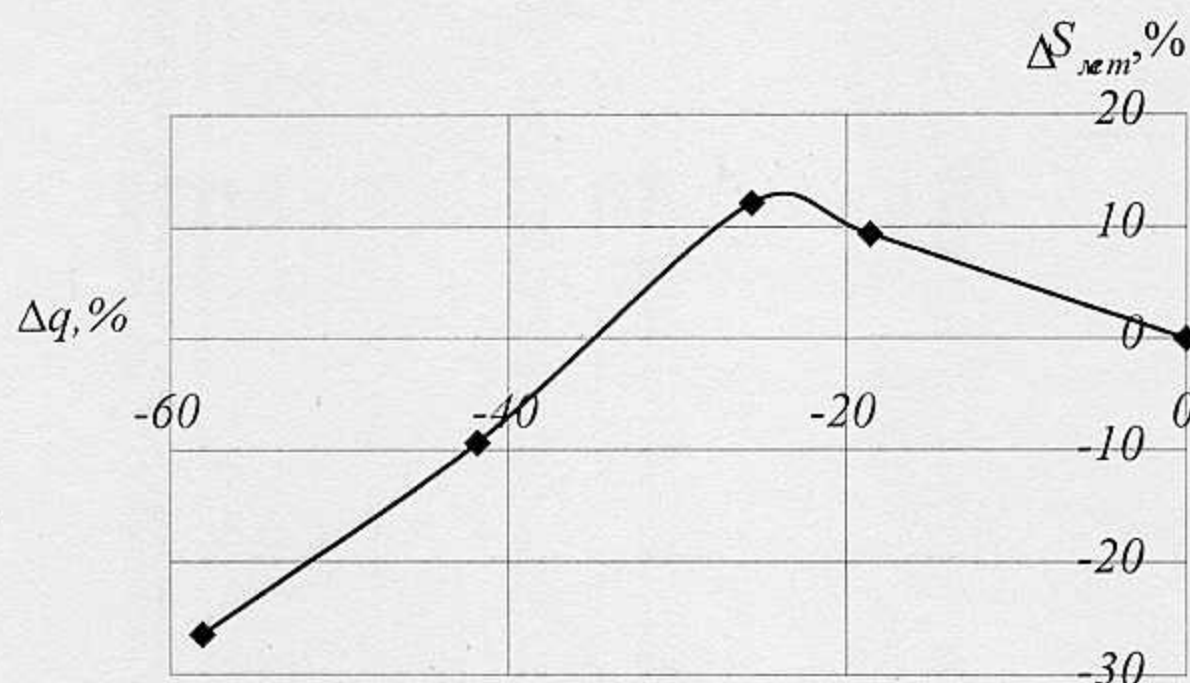


Рис. 4. Зависимость дульной скорости  $V_d$  от массы  $q$  152мм АРС

В то же время полная или частичная замена в корпусе снаряда металла на стеклопластик приводит к некоторому повышению максимального уровня интенсивности напряжений в ТТ  $\sigma_{i_{max}}$  по причине увеличения осевых  $a_x$  и центробежных  $\varpi_x$  перегрузок (табл.2), что приводит к незначительному снижению вероятности безотказной работы РДТТ. Повышение вероятности безотказной работы двигателя АРС калибра 152мм может быть достигнуто путем внесения конструктивных изменений в РДТТ, например изменением количества и толщины прокладок поз. 5,6 (рис.2а), приводящее к снижению максимального уровня напряжений в ТТ [2]. Замена стального корпуса 202мм АРС на боралюмоуглепластиковый приводит к снижению массы АРС на 35,9%, повышению дульной скорости на 27,2% и дальности метания на 29,2% (табл.2). Имеющее при этом место, снижение максимального уровня интенсивности напряжений в ТТ связано с увеличением перегрузок, приводящих к повышению контактных давлений на границе корпус РДТТ – ТТ (опытный 1 и опытный 2, табл. 2). Это, в свою очередь, повышает вероятность безотказной работы двигателя и эксплуатационную надежность АРС. Увеличение дальности метания снаряда калибра 202мм позволяет, уменьшив массу заряда ТТ, величина объемного веса которого практически не отличается от объемного веса боевого заряда (ВВ), за счет его длины, например в два раза ( $\Delta L_{ov} = -50\%$ , табл. 2 – опытный 2), повысить могущество АРС, увеличив массу ВВ кратно вышеуказанному. Уменьшение длины заряда ТТ за счет улучшения контакта с корпусом приведет к еще большему по сравнению со штатным снарядом снижению максимального уровня интенсивности напряжений в ТТ ( $\sigma_{i_{max}}^{(m)} / [\sigma]^{(m)}_c = 0,51$ ), повышению вероятности безотказной работы (до 0,91) и, как следствие, повышению эксплуатационной надежности РДТТ и всего АРС в целом.



БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНО-РЕАКТИВНЫХ СНАРЯДОВ С  
ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАДЕЖНОСТЬ ИХ МАРШЕВЫХ  
РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**Таблица 2.** Конструктивные, динамические, прочностные характеристики и параметры движения АРС

| №<br>п/п | Характеристики<br>и параметры<br>АРС              | Калибр АРС   |                |                |              |                |                |
|----------|---|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|
|          |   | 152мм        |                |                | 202мм        |                |                |
|          |   | штат-<br>ный | опыт-<br>ный 1 | опыт-<br>ный 2 | штат-<br>ный | опыт-<br>ный 1 | опыт-<br>ный 2 |
| 1        | $q, кг$   | 42,7         | 18,2           | 32             | 135,7        | 87             | 87             |
| 2        | $L_{сн}, мм$                                      | 700          | 700            | 700            | 2332         | 2332           | 2332           |
| 3        | $L_{об}, мм$                                      | 170          | 170            | 170            | 1356         | 1356           | 678            |
| 4        | $a_x, g \cdot 10^{-3} м/с^2$                      | 10,74        | 24,42          | 19,54          | 1,26         | 2,47           | 2,47           |
| 5        | $\varpi_x, рад/с$                                 | 1062         | 1579           | 1210           | 53,2         | 61             | 61             |
| 6        | $t_{\partial}, мс$                                | 14,4         | 9,6            | 10,5           | 70,3         | 36,3           | 36,3           |
| 7        | $V_{\partial}, м/с$                               | 770          | 1202           | 962            | 297          | 378            | 378            |
| 8        | $S_M \cdot 10^{-3}, м$                            | 14,053       | 10,336         | 15,753         | 6,592        | 8,520          | 8,520          |
| 9        | $\sigma^{(m)}_{i_{max}}, МПа$                     | 24,3         | 24,6           | 24,45          | 18,6         | 17,8           | 9,8            |
| 10       | $[\sigma]^{(m)}_c, МПа$                           | 25           | 25             | 25             | 19           | 19             | 19             |
| 11       | $\Delta q, \%$                                    | 0            | -58,1          | -25,6          | 0            | -35,9          | -35,9          |
| 12       | $\Delta V_{\partial}, \%$                         | 0            | 56,1           | 24,9           | 0            | 27,2           | 27,2           |
| 13       | $\Delta L_{об}, \%$                               | —            | —              | —              | —            | —              | -50            |
| 14       | $\Delta S_{мет}, \%$                              | 0            | -26,4          | 12,1           | 0            | 29,2           | 29,2           |
| 15       | $\Delta \sigma_{i_{max}}, \%$                     | 0            | 1,23           | 0,62           | 0            | -4,3           | -47,3          |
| 16       | $\sigma^{(m)}_{i_{max}} / [\sigma]^{(m)}_c$       | 0,972        | 0,984          | 0,978          | 0,98         | 0,94           | 0,51           |
| 17       | $p(\sigma^{(m)}_{i_{max}} \leq [\sigma]^{(m)}_c)$ | 0,70         | 0,72           | 0,71           | 0,86         | 0,88           | 0,91           |

## ВЫВОДЫ

1. Полная или частичная замена металлического корпуса активно-реактивного снаряда на композиционно волокнистый может способствовать повышению его баллистических характеристик: увеличению дальности поражения и скорости встречи снаряда с целью и, как следствие – повышению боевой эффективности и могущества ракетно-артиллерийского оружия.



2. Использование боралюминиевого полуфабриката для продольного армирования в композиции с углеродным волокном повышает изгибную жесткость корпуса снаряда, влияющую на точность поражения цели, работоспособность РДТТ и эксплуатационную надежность АРС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д.П.Александров, В.А.Санников. Анализ прочности метаемых тел при импульсном нагружении. Тезисы докладов XIX Международной Конференции "Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов" СПб: НИИХ СПбГУ, 2001. 124с.
2. Д.П.Александров, В.А.Санников, О.В.Митряева. Использование методов математической статистики при информационно-системном анализе работоспособности твердотопливных ракетных двигателей. Материалы V Международной Конференции "Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности металлоконструкций и методы их решения" СПб, 2003. 622с.
3. Шоршоров М.Х., Кудинов В.В., Галкин Ю.А., Ковалев И.С., Анкудинов В.Д., Цирлин А.М. Опытное производство плазменных полуфабрикатов композиционных материалов на основе борных нитей. Труды ГНИИХ и ТЭС, под редакцией А.М.Цирлина, М., 1978.
4. Д.П.Александров. Теоретическое и экспериментальное исследование возможности и целесообразности применения артиллерийских стволов из композиционных материалов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Л., 1980. 256с.

---

**SUMMARY.** Numerical simulation of influence of strain-stress properties of solid propellant and rocket case material at substitution metal case by glass-fibre-reinforced plastic on battle effectiveness of impulse-reaction shell and reliability of its functioning is shown. Statistical analysis of solid-rocket jet efficiency and recommendation on performance attributes increase are given.

---