

УДК 615.471

**А.В. ЗАХАРОВ**, кандидат  
технических наук  
**Е.А. АНТОХИН**  
**Л.Л. ВОРОНИН**

## **МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ АКТИВНЫХ ЭКЗОСКЕЛЕТОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*В статье проведен краткий анализ основных боевых свойств активных экзоскелетов военного назначения. На основе анализа предложен методический подход, позволяющий в ходе сравнительных испытаний провести количественную оценку и предварительный отбор образцов активных экзоскелетов военного назначения с использованием комплексного показателя оценки. В заключительной части работы приведен пример выполнения расчетов по предложенной методике.*

*Ключевые слова: активные экзоскелетные конструкции военного назначения; штурмовой экзоскелет; взрывотехнический экзоскелет; такелажный экзоскелет; боевые свойства активных экзоскелетов; комплексный показатель оценки.*

### **Введение**

В настоящее время отечественные и иностранные аналитики рассматривают экзоскелетные конструкции (экзоскелеты) в качестве неотъемлемого элемента перспективной боевой экипировки военнослужащего (БЭВ) [1; 2]. С их помощью предлагается снизить нагрузку на опорно-двигательный аппарат, увеличить силовые возможности и повысить выносливость «солдата будущего».

Экзоскелеты военного назначения по наличию в их составе источника энергии и движителей подразделяются на *пассивные* и *активные*.

*Пассивный экзоскелет* представляет собой антропоморфную шарнирно-рычажную конструкцию, в которой в качестве источника энергии используется только мышечная сила оператора.

*Активный экзоскелет* представляет собой антропоморфный шарнирно-рычажный комплекс с интегрированными в него силовыми приводами, работа которых обеспечивается источником энергии.

Существующие и разрабатываемые иностранными специалистами экзоскелеты военного назначения отличаются многообразием предназначения, техническими решениями и конструктивным исполнением (рисунок 1).

На современном этапе существующая потребность в экзоскелетах для Вооруженных Сил Российской Федерации заявлена в плане реализации Комплексной целевой программы «Роботизация-2025», утвержденной Министром обороны Российской Федерации 10 октября 2014 г. Актуальность работ в рассматриваемой области подтверждена также решениями заседаний межведомственной рабочей группы (лаборатории) при Военно-промышленной комиссии Российской Федерации и научно-технических совещаний Совета главных конструкторов по созданию БЭВ.



Рисунок 1 – Зарубежные образцы экзоскелетных конструкций, разработанные в интересах армейских структур

Данная потребность реализуется предприятиями отечественного оборонно-промышленного комплекса в инициативных проектах по разработке экзоскелетов различной конструкции и целевого предназначения. При этом вместе с положительным эффектом наблюдается значительное и необоснованное расширение номенклатуры создаваемых экзоскелетных конструкций.

По этой причине в рамках комплекса работ по унификации базовых элементов БЭВ полагается целесообразным проведение сравнительных испытаний экзоскелетов военного назначения, разработанных в инициативном порядке предприятиями промышленности, высшими учебными заведениями и научно-исследовательскими организациями, на предмет соответствия их заявленных возможностей требованиям Минобороны России.

Проведение и анализ результатов указанных испытаний в интересах создания БЭВ позволит:

- оптимизировать номенклатуру экзоскелетных конструкций военного назначения;
- ускорить внедрение передовых технологий в войска;
- обеспечить единообразие требований;
- существенно снизить в дальнейшем производственно-эксплуатационные расходы;
- предметно рассматривать вопросы рациональной унификации применяемых технических решений.

В этой связи разработка методического аппарата, позволяющего получать количественные оценки результатов сравнительных испытаний экзоскелетов военного назначения для их предварительного отбора, представляется актуальной научно-технической задачей.

## **Постановка задачи**

В работах [3-6] предложена номенклатура основных боевых свойств активных экзоскелетов.

### *1. Автономность*

Способность экзоскелета выполнять целевые функции при решении боевых задач без дополнительных источников питания и в отрыве от основных сил. Частными свойствами автономности могут быть: время непрерывной работы, возможность подзарядки в процессе работы (от промышленной сети и от бортовой сети боевых машин, автотранспорта, десантных вертолетов, транспортных самолетов и т.п.).

### *2. Защищенность*

Способность экзоскелета выполнять целевые функции, а также обеспечивать защиту военнослужащего-оператора при решении

боевых задач в условиях воздействия поражающих факторов вооружения противника. Частными свойствами защищенности могут являться: наличие бронирования (защиты от стрелкового оружия и осколков), полнота и тип экзоскелета (полный костюм или отдельные модули), противоминная стойкость и защищенность от оружия массового поражения, способность к регенерации полученных повреждений.

### *3. Подвижность*

Способность экзоскелета обеспечивать мобильность, скорость передвижения, а также высокую точность и скорость реакции, необходимые для выполнения целевых функций. В качестве частных свойств подвижности могут рассматриваться: максимальная скорость передвижения, время достижения максимальной скорости, время реакции системы управления, точность обработки сигналов управления.

### *4. Грузоподъемность*

Способность экзоскелета обеспечивать подъем груза заданной массы на заданную высоту, способность к удержанию грузов при их монтаже и перемещении. Частными свойствами грузоподъемности могут являться: максимальная масса поднимаемого груза, максимальное развиваемое усилие грузоподъемного устройства и др.

### *5. Компенсация силового воздействия нагрузки*

Отношение поднимаемого веса к весу, воспринимаемому оператором.

### *6. Эргономичность*

Способность экзоскелета выполнять заданные функции, обеспечивая при этом максимальную свободу движений, удобство ношения, возможность совместного использования с элементами БЭВ, а также применение в ограниченных пространствах.

Частными свойствами эргономичности могут быть: максимальное время надевания и снятия, возможность подгонки размера, наличие системы кондиционирования, способность сохранять равновесие и т.д.

### *7. Массоэффективность*

Отношение максимальной массы поднимаемого груза к полной массе экзоскелета. Обеспечение приемлемой массоэффективности является одной из важнейших научно-технических проблем создания экзоскелетов, которая может быть решена путем поиска и применения новейших облегченных материалов с повышенными прочностными характеристиками.

Таким образом, в общем виде системный показатель, отражающий проявление основных боевых свойств активных экзоскелетов военного назначения, может быть представлен следующим образом:

$$X_{об} = \{A; Z; V; G; K; E; Q\}, \quad (1)$$

и соответствующими весовыми коэффициентами:

$$K = \{k_A; k_Z; k_V; k_G; k_K; k_E; k_Q\}, \quad (2)$$

где  $A$  – время непрерывной работы, ч (показатель, характеризующий автономность);  $Z$  – класс бронезащиты, безразмерный (показатель, характеризующий защищенность);  $V$  – максимальная скорость передвижения, км/ч (показатель, характеризующий подвижность);  $G$  – максимальная масса поднимаемого груза, кг (показатель, характеризующий грузоподъемность);  $K$  – коэффициент компенсации силового воздействия нагрузки, безразмерный (показатель, характеризующий компенсацию усилия);  $E$  – показатель эргономики, учитывающий время надевания и время снятия, ч;  $Q$  – коэффициент массоэффективности, безразмерный (показатель, характеризующий массоэффективность).

При проведении оценки результатов сравнительных испытаний потребуется выполнить сравнительный анализ всех исследуемых образцов. Для этого необходимо выбрать единый числовой показатель, который бы обеспечил корректность процедуры сравнения.

### Предлагаемое решение

Для количественной оценки и предварительного отбора образца предлагается в качестве критерия использовать коэффициент технического уровня ( $K_{ТУ}$ ), который в общем случае для каждого экзоскелета военного назначения может быть вычислен по формуле [7; 8]:

$$K_{ТУ} = \sum_{i=1}^N \bar{k}_i \bar{X}_i, \quad (3)$$

где  $i$  – порядковый номер боевого свойства (характеристики);  $N$  – общее число боевых свойств (характеристик);  $\bar{k}_i$  – нормированный весовой коэффициент  $i$ -го боевого свойства;  $\bar{X}_i$  – относительное значение характеристики  $i$ -го боевого свойства, вычисляемое по формуле (4):

$$\bar{X}_i = \begin{cases} \frac{X_i}{X_{эти}} & , \text{ если повышению технического уровня} \\ & \text{соответствует увеличение характеристики} \\ \frac{X_{эти}}{X_i} & , \text{ если повышению технического уровня} \\ & \text{соответствует уменьшение характеристики} \end{cases} \quad (4)$$

где  $X_i$  – характеристика  $i$ -го боевого свойства;  $X_{эти}$  – эталонное значение  $i$ -го боевого свойства.

За эталонные величины исследуемых боевых свойств при расчетах могут приниматься числовые значения, установленные в нормативных документах по боевой подготовке. Кроме того, при формировании эталонных значений исследуемых свойств могут быть также использованы материалы работ [4-6], в которых предложены ТТТ к перспективным экзоскелетным конструкциям военного назначения (таблица 1).

Следует отметить, что для получения объективной количественной характеристики таких сложно оцениваемых свойств, как, например, эргономичность или компенсация воздействия нагрузки, требуется проведение дополнительных развернутых исследований.

Таблица 1 – Сводные тактико-технические требования, предъявляемые к перспективным экзоскелетным конструкциям военного назначения

Показатели основных боевых свойств	Штурмовой экзоскелет	Взрывотехнический экзоскелет	Такелажный экзоскелет
Защищенность	противопульная и противоосколочная броня, интегрированная в состав экзоскелета, минно-взрывная защита нижних конечностей	интегрированная в состав экзоскелета сочетаемость с элементами общевойскового комплекта разминирования	не требуется
Автономность	не менее 24 часов	не менее 12 часов	не менее 4 часов или неограниченно (от внешнего источника)
Система питания	аккумуляторы или топливные элементы с возможностью подзарядки от различных источников		от сети переменного тока, генераторов, аккумуляторов
Тип приводов	гидравлический или электрический		
Максимальная масса экзоскелета	до 70 кг	до 90 кг	до 80 кг
Массоэффективность	масса поднимаемого груза минимум в 2 раза больше массы экзоскелета		масса груза в 3 раза больше массы экзоскелета
Грузоподъемность	от 120 до 140 кг	до 180 кг	до 250 кг
Скорость передвижения	15 км/ч	10 км/ч	5 км/ч
Эргономика	возможность подгонки размера, время надевания – 60 с, снятия – 20 с	возможность подгонки размера, время надевания – 180 с, снятия – 60 с	возможность подгонки размера, время надевания – 80 с, снятия – 40 с
Коэффициент компенсации силового воздействия нагрузки	не менее 3:1		не менее 5:1



В случае отсутствия установленных требований на значение исследуемой характеристики (свойства) допускается в качестве эталонного применять наилучшее значение данной характеристики (свойства), полученное в ходе проведенных сравнительных испытаний.

Для характеристик (свойств), уровень реальной воплощенности которых превосходит эталонные значения, указанное повышение не рассматривается как преимущество и при расчетах относительное значение характеристики приравнивается к единице.

Весовые коэффициенты назначаются по пятибалльной шкале экспертами, являющимися специалистами в области БЭВ и аналитиками оперативно-тактического профиля.

Оптимальное количество специалистов, привлекаемых для экспертной оценки и назначения весовых коэффициентов – от 5 до 15 человек.

В качестве показателя обобщенного мнения экспертов предпочтительно использовать среднее арифметическое значение величины весовых коэффициентов, выставленных экспертами каждому  $i$ -му боевому свойству (характеристике) исследуемого образца, которое может быть вычислено по формуле:

$$k_{cpi} = \frac{\sum_{j=1}^G k_{ij}}{G}, \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad (5)$$

где  $i$  – порядковый номер боевого свойства (характеристики);  $N$  – общее число боевых свойств (характеристик);  $j$  – порядковый номер эксперта;  $G$  – общее число привлекаемых экспертов;  $k_{ij}$  – весовой коэффициент, выставленный  $j$ -м экспертом  $i$ -му боевому свойству (характеристике).

3. В качестве показателя степени согласованности мнений экспертов полагается целесообразным использовать коэффициент вариации  $K_B$ .

$$K_B = \frac{\sigma_i}{k_{cpi}}, \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad (6)$$

где  $i$  – порядковый номер боевого свойства (характеристики);  $N$  – общее число боевых свойств (характеристик);  $\sigma_i$  – среднеквадратичное отклонение весовых коэффициентов, выставленных экспертами  $i$ -му боевому свойству (характеристике);  $k_{cpi}$  – среднее арифметическое значение весовых коэффициентов, выставленных экспертами  $i$ -му боевому свойству (характеристике).

При этом согласованность экспертов признается удовлетворительной, если  $K_B \leq 0,3$ ; хорошей при  $K_B \leq 0,2$ . При значении  $K_B > 0,3$  следует подобрать новый состав экспертов.

4. По своей сути весовые коэффициенты после проведения процедуры нормирования (7) отражают важность оцениваемой характеристики, исходя из конкретного целевого предназначения экзоскелетной конструкции военного назначения [7; 8].

$$k_{срi} \rightarrow \overline{k_i}, \quad \overline{k_i} \in [0; 1], \quad \sum_{i=1}^N \overline{k_i} = 1 \quad (7)$$

Комплексный показатель оценки  $K_{ТУ}$  при указанных исходных данных может быть вычислен по формуле:

$$K_{ТУ} = \overline{k_A} \frac{A}{A_{ЭТ}} + \overline{k_Z} \frac{Z}{Z_{ЭТ}} + \overline{k_V} \frac{V}{V_{ЭТ}} + \overline{k_G} \frac{G}{G_{ЭТ}} + \overline{k_K} \frac{K}{K_{ЭТ}} + \overline{k_E} \left( \frac{1}{2} * \frac{E_{ЭТн}}{E_n} + \frac{1}{2} * \frac{E_{ЭТс}}{E_c} \right) + \overline{k_Q} \frac{Q}{Q_{ЭТ}} \quad (8)$$

Наилучшим из образцов признается экзоскелет с наибольшим значением  $K_{ТУ}$ , удовлетворяющий условиям ограничения по заданной массе и стоимости, то есть:

$$\begin{cases} K_{ТУ} \rightarrow \max \\ M_{обр} \leq M_{зад}, \\ C_{обр} \leq C_{зад} \end{cases}$$

где  $K_{ТУ}$  – коэффициент технического уровня исследуемого образца;  $M_{обр}$  – масса исследуемого образца;  $M_{зад}$  – ограничение по массе образца;  $C_{обр}$  – стоимость исследуемого образца;  $C_{зад}$  – ограничение по стоимости образца.

Если вычисленные значения  $K_{ТУ}$  двух лучших образцов экзоскелетов отличаются друг от друга менее чем на 15%, то такие образцы признаются равными и для окончательного решения требуется проведение дополнительных исследований с привлечением специалистов в области БЭВ.

## Пример расчетов по методике

Для иллюстрации предлагаемого подхода рассмотрим следующий гипотетический пример. Пусть в ходе сравнительных испытаний пяти исследуемых образцов получены следующие результаты (таблица 2).

При проведении расчетов принято условие равенства всех значений нормированных весовых коэффициентов. За эталонные величины характеристик (свойств) исследуемых образцов в данном примере при расчетах приняты наилучшие значения, полученные в ходе проведения сравнительных испытаний.

На рисунке 2 представлена гистограмма значений комплексного показателя оценки для каждого исследуемого образца.



Таким образом, наилучшим является образец с наибольшим значением комплексного показателя оценки  $K_{ТУ}$  (образец 3), при условии его соответствия ограничениям по массе (штурмовой – 70 кг; взрывотехнический – 90 кг; такелажный – 80 кг) и заданной стоимости.

Таблица 2 – Характеристики исследуемых образцов, полученные в ходе сравнительных испытаний

№ п/п	Наименование характеристики (свойства)	Обозначение	Эталонное значение	Номер образца				
				1	2	3	4	5
1.	Время непрерывной работы, ч	A	24	12	10	24	20	15
2.	Класс бронезащиты	Z	5	3	3	5	нет	нет
3.	Максимальная скорость передвижения, км/ч	V	15	15	15	10	8	7
4.	Максимальная масса поднимаемого груза, кг	G	140	100	115	140	110	120
5.	Коэффициент компенсации силового воздействия нагрузки	K	3	3	2	3	2,5	1,5
6.	Время надевания, с	$E_n$	60	80	75	70	60	100
7.	Время снятия, с	$E_c$	20	25	25	20	30	40
8.	Коэффициент массозффективности	Q	5	3	3	4	5	4

Таблица 3 – Результаты расчетов

Комплексный показатель оценки $K_{ТУ}$	Номер образца				
	1	2	3	4	5
	0,742	0,701	0,915	0,689	0,543

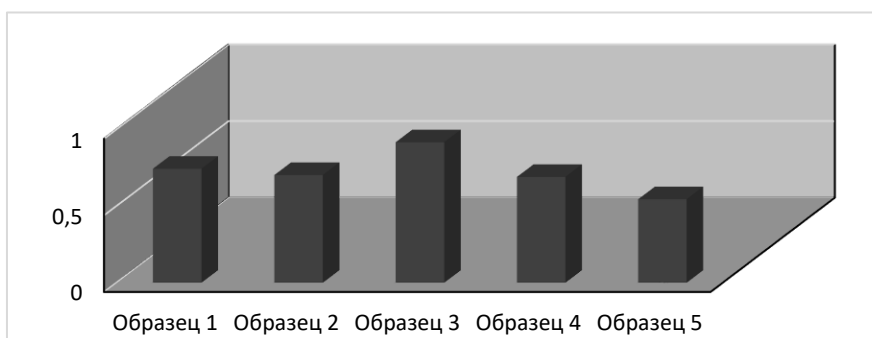


Рисунок 2 – Гистограмма значений комплексного показателя оценки  $K_{ТУ}$

## Выводы

1. Предлагаемый методический подход позволяет получить количественную оценку соответствия активных экзоскелетных конструкций военного назначения, разработанных в инициативном порядке, заданным требованиям заинтересованных (потенциальных) потребителей.

2. Полученная количественная оценка может лечь в основу аргументации выбора рационального варианта в ходе сравнительной оценки нескольких однотипных образцов активных экзоскелетов военного назначения.

3. Одним из недостатков изложенного подхода является субъективизм мнений экспертов при определении значимости (весомости) той или иной характеристики (свойства) исследуемых образцов активных экзоскелетов военного назначения.

4. К достоинствам подхода можно отнести возможность получения обобщенной комплексной характеристики, позволяющей оценить технический уровень исследуемых образцов активных экзоскелетов военного назначения.

## Список использованных источников

1. Статников А.А. Кибернетизация и использование экзоскелетов в медицинской и военной сфере // Современные исследования. 2018. №1(5). – С.53-55.

2. Гараев А.З., Тещаев И.А. Применение экзоскелетов в комплексе вооружения современных войск мира // Сборник материалов V Международной научно-практической конференции. 2018. – С.109-114.

3. Новак К.В. Справочные данные по состоянию разработок в области создания экзоскелетов военного назначения. Доклад. М.: ГНИИЦ РТ МО РФ, 2016. – 11 с.

4. Новак К.В., Винокурова Ю.С. Метод исследования потенциальной эффективности применения экзоскелетов в боевой экипировке военнослужащих // Вопросы безопасности. 2016. №5. – С.1-10.

5. Новак К.В. Перспективы создания отечественных экзоскелетных комплексов военного назначения // Тематический сборник статей по вопросам проведения испытаний робототехнических комплексов военного и специального назначения. 2018. – С. 124-136.

6. Угревский С.В., Чичков А.Н. Требования к экзоскелетам военного назначения // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2014. №11-12. – С.114-120.

7. Буренок В.М., Погребняк Р.Н., Скотников А.П. Методология обоснования перспектив развития средств вооруженной борьбы общего назначения. М.: Машиностроение, 2010. – 368 с.

8. Хрипунов С.П., Благодарящев И.В. Аналитическая оценка образцов робототехнических комплексов военного назначения, разработанных в инициативном порядке // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2015. №5. – С.41-48.