

УДК 539.3

*Хлань А.В., Малакей А.Н., Ткачук Н.А., д-р техн. наук; Зарубина А.А., канд. техн. наук; Грабовский А.В., канд. техн. наук; Танченко А.Ю., канд. техн. наук; Васильев А.Ю., канд. техн. наук; Литвиненко А.В., д-р техн. наук; Посохов В.В.; Кохановская О.В.; Набоков А.В.*

## **ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БОЕВЫХ БРОНИРОВАННЫХ МАШИН: ПОДХОДЫ, МОДЕЛИ И МЕТОДЫ**

**Введение.** Бронетанкостроение Украины сложилось как одна из основных отраслей военно-промышленного комплекса. При этом в свое время для обеспечения тактико-технических характеристик (ТТХ) военных гусеничных и колесных машин (ВГКМ) действовала стройная система, охватывающая все этапы жизненного цикла изделий – от формирования тактико-технических требований Вооруженными Силами до полигонных испытаний и боевого применения. В этой сложившейся системе важнейшими этапами, на которых закладываются, обеспечиваются и воплощаются ТТХ боевых бронированных машин (ББМ), являются соответственно их конструирование, технологическая подготовка и производство. Все эти этапы нуждаются в соответствующем научном сопровождении. Аналогичная ситуация была и в других странах-производителях бронетехники.

В то же время, анализируя сегодняшнее состояние всех упомянутых выше звеньев обеспечения ТТХ военных гусеничных и колесных машин в бронетанкостроении Украины, можно сделать заключение, что на протяжении десятков лет основное внимание уделялось проектным разработкам новой техники и ее изготовлению. Это обусловлено тем, что в Украине действуют флагманы отечественного и бывшего советского бронетанкостроения – ГП "Харьковское конструкторское бюро по машиностроению им. А.А. Морозова" (ГП "ХКБМ им. А.А. Морозова") и ГП "Завод им. В. А. Малышева". Вместе с тем гораздо меньшее внимание уделялось технологической подготовке производства (ТПП) и научному сопровождению всех этапов разработки новой техники. В результате образовался определенный перекос во всем цикле создания новых объектов бронетанковой техники с высокими ТТХ. Ниша, занимаемая научно-исследовательскими технологическими институтами, с одной стороны, и другими институтами оборонной промышленности – с другой, в настоящее время функционально не заполнена на необходимом уровне.

Исходя из того, что ТТХ военных гусеничных и колесных машин требуют соблюдения баланса затрат, квалификации и уровня деятельности на проектном этапе, при исследованиях, технологической подготовке производства и непосредственно при их изготовлении, можно сделать вывод о том, что одной из важнейших проблемных компонент является как раз технологическая подготовка и научное сопровождение разработок ВГКМ.

Также следует принять во внимание, что отечественное бронетанкостроение сравнительно недавно начало развивать разработку и изготовление легкобронированных машин (ЛБМ), в частности, колесных, для которых, в отличие от боевых машин тяжелой категории по массе, возникают свойственные только им проблемные вопросы. Во-первых, это связанность многих компонент ТТХ, которые для тяжелых машин разделялись. Так, массивная и пассивная бронезащита последних принципиально покрывала потребности в жесткости и прочности корпуса как несущего элемента конструкции, замыкающего на себе силовые потоки от усилий подвески, от реактивных усилий при стрельбе из собственных систем вооружения, от действия силовых, весовых и инерционных нагрузок со стороны двигателя, трансмиссии и т.п. Таким образом, составляющие защищенности, деформируемости и точности ведения огня, прочности при динамических и импульсных

© А.В. Хлань, 2017

воздействиях и т. п. разнесены для этих машин в последовательности проектного обеспечения конечных ТТХ. Однако для легкобронированных машин эти вопросы в силу тонкостенности конструкции взаимосвязаны непосредственно. Например, защищенность обуславливается распределением бронелистов по проекциям корпуса, тем самым определяя прочностные и жесткостные характеристики, а также объем и конфигурацию забронированного пространства – важные компоненты обитаемости, массу и форму внешних обводов, которые влияют на характеристики подвижности и т. п. Таким образом, все эти компоненты ТТХ следует обеспечивать согласованно. При этом первичной по-прежнему остается проблема защищенности и прочности как отправного элемента при разработке ЛБМ.

В то же время углублялись также и проблемные вопросы по элементам тяжелых боевых машин. Это обусловлено возросшими нагрузками на узлы, системы и агрегаты этих машин, интенсифицированными воздействиями поражающих факторов и исчерпанием ресурса развития традиционных технических решений. В этих условиях становятся неприменимыми традиционные методики расчета проектно-технологически-производственных решений.

Кроме того, все составляющие тактико-технических характеристик проявляются на этапе боевого применения при действии комплекса поражающих факторов, что сопровождается различными физико-механическими процессами. Таким образом, еще одной проблемной стороной обеспечения заданных ТТХ является их органическая связь с процессами и состояниями, определяемыми режимами боевого применения боевых бронированных машин, а также проектно-технологически-производственными решениями, параметрами и условиями производства машин. Соответственно, на этапе разработки получить определенное представление об уровне ТТХ боевых машин можно только расчетным путем. Учитывая, что поражающие факторы имеют тенденцию к росту интенсивности и увеличению разнообразия их типов, применяемые новые материалы бронекорпусов, а также других элементов, систем и агрегатов, характеризуются послойной неоднородностью свойств, а реализуемые физико-механические процессы характеризуются существенной нелинейностью, то речь может идти о компьютерном моделировании. В то же время отработанные устоявшиеся методики компьютерного моделирования всей совокупности процессов и состояний, в полной мере решающие весь комплекс возникающих задач, в настоящее время отсутствуют. Существующие исследования Центрального научно-исследовательского института вооружения и военной техники ВСУ, Национального университета обороны Украины, ХКБМ им. А.А. Морозова, Национальной академии сухопутных войск им. гетмана Петра Сагайдачного, Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" посвящены отдельным аспектам моделирования физико-механических процессов в увязке с достижением тех или иных составляющих ТТХ. Это, например, защищенность от действия кумулятивных боеприпасов, воздействие взрывов мин, динамика движения по пересеченной местности и нагружение элементов подвески и т. п. В то же время не нашли своего завершеного решения задачи обоснования проектно-технологически-производственных решений, определяющих уровень защищенности и прочности корпусов ЛБМ, элементов подвески, двигателя и трансмиссии. В доступных зарубежных публикациях также отсутствует комплексная постановка и решение таких проблем.

Принимая во внимание комплекс перечисленных аспектов, можно сделать вывод, что в настоящее время сложилось определенное противоречие между возросшими потребностями бронетанкостроения в научно обоснованных проектно-технологически-производственных решениях по обеспечению ТТХ объектов бронетанковой техники, с одной стороны, и недостаточно развитой теоретической основой исследований, – с другой. Для разрешения этого противоречия необходим комплекс масштабных разработок, на одну из составляющих которых направлена данная работа.

*Целью* работы является разработка научных основ проектно-технологически-производственного обеспечения защищенности и прочности военных гусеничных и колесных машин легкой и тяжелой категорий по массе на основе результатов математического моделирования физико-механических процессов и состояний их элементов при действии средств поражения с учетом технологических и производственно-технологических факторов для обоснования на их основе рациональных проектно-технологически-производственных решений.

**Методология исследований.** Для создания теоретических основ проектно-технологического обеспечения защищенности объектов бронетанковой техники был привлечен метод обобщенного параметрического моделирования сложных механических систем, дополненный описанием проектно-технологических решений как варьируемых обобщенных параметров. Формирование математических моделей физико-механических процессов и состояний осуществлено на базе аппарата механики сплошной среды, в том числе – теории упругости и пластичности, уравнений газодинамики, теории колебаний. Дискретизация разрешающих уравнений производится в основном методом конечных элементов (МКЭ). Основное русло исследований является продолжением и развитием подходов, изложенных в [1-6].

**Общий подход к проектно-технологическому обеспечению защищенности и прочности бронекорпусов транспортных средств специального назначения.** Как отмечалось выше, применение некомплексного подхода к анализу процессов и состояний от воздействия поражающих факторов на элементы боевых бронированных машин, а тем более – к синтезу проектно-технологических решений, режимов и параметров не может дать в современных условиях приемлемых результатов. Это обусловлено возросшей мощностью применяемого вооружения, а также прогрессирующим их многообразием и расширяющимся спектром условий применения и повышением интенсивности режимов эксплуатации и боевого использования. Данные факторы образуют множество режимов действия поражающих факторов (РДПФ). С другой стороны, объект, находящийся под действием поражающих факторов (например, бронекорпус), является продуктом не только проектных разработок, но и следствием принятия тех или иных технологических решений, а также результатом приложения конкретных производственных условий изготовления, оборудования, материалов, инструмента и режимов обработки. Речь идет в данном случае о том, что при формировании расчетных ТТХ тех или иных объектов ББМ принимаются в расчет, как правило, только их конструктивное исполнение и параметры. В то же время и технология изготовления, и процесс производства могут оказать деформирующее воздействие на изначально заложенные проектные решения. Особенно это может сказаться на свойствах бронекорпусов легкобронированных машин, представляющих собой сварные пространственные тонкостенные конструкции, состоящие из внешних панелей с внутренним силовым каркасом. И свойства материала панелей по толщине, в плане, в зоне сварных соединений, и места расположения сварных швов, и способ раскройке бронелистов, а также способ изготовления внутреннего силового каркаса и соединения его с обшивкой, могут оказаться теми факторами, которые либо потенциально, либо реально ухудшают уровень защищенности бронекорпусов [1]. Другим ярким примером могут быть торсионные валы подвески, на условия работы которых накладывается технологическая наследственность после операций заневоливания. При этом напряженное состояние от эксплуатационной нагрузки складывается с остаточным состоянием после изготовления. В результате требуется найти баланс различных составляющих при обосновании технических решений, идущий от уровней нагрузок, с одной стороны, и от требований по подвижности, – с другой. Такой же характер ситуации – при оценке стойкости стволов танковых пушек, прочности и

жесткости высокооборотных элементов двигателей. Соответственно, эти факторы необходимо учитывать во множестве проектно-технологически-производственных факторов (ПТПФ).

Таким образом, тактико-технические характеристики БМ являются функцией и РДПФ, и ПТПФ.

Что касается ПТПФ, то по отдельности взятые группы проектных, технологических и производственных факторов находятся в условиях конкурентно-ограничительных отношений. Традиционно технологические факторы могут сужать более широкие конструктивные возможности, заложенные в проекте машины, и тем самым потенциально снижать ее ТТХ. В аналогичных отношениях находятся технологические и производственные факторы. В данном случае, кроме тактико-технических, вступают в силу экономические характеристики. В результате в цепочке "проектант – технолог – изготовитель" каждый последующий уровень факторов (в любом из разрезов) находятся, как правило, в отношениях сужающего по отношению к любому из компонентов предыдущего. В данном случае для получения изделия с наилучшими ТТХ следует применять компромиссную стратегию с гармонизацией (сбалансированностью) требований–ограничений на каждом этапе и в пределах каждого среза отношений (т.е. по любому сочетанию связей компонент из разных уровней).

В этой ситуации требуется разработать некоторую стратегию обеспечения ТТХ вновь создаваемых или модернизируемых машин путем обоснования проектно-технологических решений для их элементов, в т.ч. для ЛБМ – бронекорпусов. При этом для их конкретного использования требуется введение некоторых отдельных управляющих, оценочных, критериальных величин. В приложении к проблеме обеспечения защищенности это могут быть: геометрические параметры элементов бронеплит и силового внутреннего каркаса (толщины, размеры в плане, углы наклона и т.п.); свойства материалов элементов бронекорпусов, в т.ч. по толщине и в плане, в зоне сварных швов (предел выносливости, предел прочности, предел текучести, твердость, плотность и т.п.); скорость кондиционного поражения; избыточное давление, вызывающее разгерметизацию корпуса или неработоспособность систем и агрегатов машины; зона расположения сварных швов и их типы и т.д. В приложении к обеспечению огневой мощи речь идет, например, о прочности и стойкости танковых стволов. В аспекте подвижности можно исследовать вопросы работоспособности и выносливости торсионных валов подвески.

В целом эти группы величин можно объединить в группы РДПФ, ПТПФ и ТТХ соответственно [1]

$$\mathbf{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_{N_p}\}^T; \quad \mathbf{\Pi} = \{\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{N_{\Pi}}\}^T; \quad \mathbf{T} = \{T_1, T_2, \dots, T_{N_T}\}^T. \quad (1)$$

В данном представлении определенные компоненты массивов  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{\Pi}$ ,  $\mathbf{T}$  могут представлять собой не только численные, но и обобщенные параметры (например, структура конструкции, распределение свойств материалов по толщине, конструктивные или технологические решения и т.п.). В таком случае эти факторы (параметры) можно, следуя [6], считать обобщенными, перенося на них (и расширяя, таким образом) правила оперирования с различными числовыми величинами. Такая процедура с точки зрения теории множеств является допустимой, если только ввести некоторые правила для оценки соотношения отдельных элементов множеств. В данной работе используются те же правила, что и в [6], однако распространенные на новый класс факторов (технологические и производственные, причем в сочетании с проектными).

С учетом "декомпозиции"  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{\Pi}$ ,  $\mathbf{T}$  вместо "односрезных" отношений  $\mathbf{T}$ ,  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{\Pi}$  появляются многие срезы отношений компонент " $\mathbf{T}_k - \mathbf{P}_i - \mathbf{\Pi}_j$ ", что, однако, не меняет их сути, а

лишь переводит точки пространства **T, P, Π** из трехмерного в многомерное. Используя введенные обозначения, можно провести следующую классификацию множеств параметров  $P$  и  $\Pi$  [1]:

$$P = P_d \cup P_y = P_k \cup P_b; \quad (2) \quad \Pi = \Pi_\Pi \cup \Pi_T \cup \Pi_u. \quad (3)$$

Здесь  $P_d, P_y$  соответствуют подмножеству дополняющих и усиливающих факторов;  $P_k, P_b$  – кинетическим боеприпасам и ударной волне, а  $\Pi_\Pi, \Pi_T, \Pi_u$  – проектные, технологические и производственные факторы.

Введем, следуя [1], следующие критерии.

Критерий наиболее рационального удовлетворения требований по различным компонентам ТТХ и технических решений формализуется следующим образом:

$$\max \left\| \Pi_k(T^*, P_{yi}^*) - \Pi_k(T^*, P_{dj}^*) \right\| \rightarrow \min \forall i \neq j, \forall k; \quad (4)$$

$$\max I_I \left[ \Pi_k(T^*, P_i^*) \right] \rightarrow \min(\max). \quad (5)$$

Здесь в виде  $\|*\|$  записана введенная некоторым образом, зависящим от специфики решаемой задачи, псевдонорма в пространстве  $\Pi$  [1,6]. В качестве оптимизируемой величины здесь выступает критерий  $I_I$ , объединяющий те или иные требования по компонентам ТТХ с учетом типа действующего поражающего фактора и его характеристик.

Критерий минимальных рассогласований проектных, технологических и производственных решений, обеспечивающих требуемый уровень ТТХ, может быть представлен в виде [1]:

$$\left\| \Pi_\Pi^* - \Pi_T^* \right\| \rightarrow \min; \quad \left\| \Pi_T^* - \Pi_u \right\| \rightarrow \min. \quad (6)$$

Здесь также присутствуют псевдонормы в рассматриваемом пространстве  $\|*\|$ .

Следующий критерий поиска устойчиво-предпочтительного решения можно записать в виде [1]:

$$\left. \begin{aligned} \Pi^{**}, P^{**} : \left\| T^{**}(\Pi^{**}, P^{**}) - T^*(\Pi^*, P^*) \right\| \leq \varepsilon; \quad T(P^{**} + \Delta P, \Pi^{**} + \Delta \Pi) \geq T^*; \\ \left\| T(\Pi^{**} + \Delta \Pi, P^{**} + \Delta P) \right\| \leq \delta; \quad \forall (\Pi^{**} + \Delta \Pi, P^{**} + \Delta P) \in \Omega^{**} \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

В данном выражении присутствуют:  $\varepsilon$  – допустимый уровень ухудшения оптимальных характеристик  $T^*$ ;  $(\Pi^{**}, P^{**})$  – псевдооптимальное решение, отличающееся, с одной стороны, близостью  $T^{**}$  к  $T^*$ , а с другой, – устойчивостью ТТХ при варьировании  $(P, \Pi)$  в заданной окрестности  $(\Delta P, \Delta \Pi)$ , т.е. изменение  $T(P^{**} + \Delta P, \Pi^{**} + \Delta \Pi)$  не превышает заданную величину  $\delta$ . Область, содержащая искомое решение и упомянутую окрестность  $(\Delta P, \Delta \Pi)$ , обозначена в (7) через  $\Omega^{**}$ .

Последовательное применение формализованных критериев и ограничений (4)-(7) как раз сопровождается пошаговым приближением к рациональному техническому решению  $\Pi^{**}$ , при некоторых режимах действия поражающих факторов  $P^*$  обеспечивающему

уровень ТТХ не хуже заданного:  $T^{**} \geq T^{\wedge}$ .

Предложенный в работе подход, методология действий, формулировка критериев и ограничений резко отличаются и сам процесс поиска рационального решения, и его результат от традиционных [7,8]. Во-первых, вводимые пространства варьируемых факторов являются обобщенными [1,6]. Во-вторых, фигурирующие здесь псевдонормы  $\|*\|$  и функционалы  $I_I$  являются потенциально уточняемыми в ходе самого процесса проектирования, технологической подготовки и собственно производства. При этом их вид зависит от учета весовых коэффициентов тех или иных критериев. И, в-третьих, в отличие от оптимального решения  $P^*$ , искомое решение  $P^{**}$  не является единственным. Упомянутые особенности являются достаточно существенными, приближая процесс принятия рационального решения к тому, который в действительности свойственен реальным условиям проектирования, технологической подготовки производства и изготовления ВКГМ, а также принципиально отличая его от традиционных методов параметрического и структурного синтеза [9,10].

Кроме того, в отличие от работы [1], в предложенном подходе особое внимание уделено как раз сочетанию производственно-технологических факторов, влияющих на ТТХ ББМ наравне с проектными решениями.

Таким образом, изложена структура исследований, в завершении которых формируются научно обоснованные рекомендации по проектно-технологически-производственному обеспечению ТТХ.

**Общие методы и модели для решения поставленной проблемы.** Предложенный выше общий подход к проектно-технологическому обеспечению ТТХ боевых бронированных машин, декларирующий значительные преимущества обобщенного параметрического моделирования сложных механических систем, тем не менее неизбежно должен быть интегрирован в математические и компьютерные модели физико-механических процессов и состояний исследуемых объектов. Действительно, этот подход как раз тем и ценен, что создает единую методологическую платформу для решения возникающих задач анализа и синтеза. Ниже описана эта часть решения проблемы в развитии работ [1,6,11].

Как отмечалось выше, одной из ключевых проблем, сопровождающих проектирование, технологическую подготовку и изготовление новых ББМ легкой и тяжелой категории по массе, является проектно-технологически-производственное обеспечение их тактико-технических характеристик. Это обусловлено тем, что, во-первых, только за счет конструктивных решений нельзя обеспечить требуемый уровень ТТХ, – требуется и их технологическое обеспечение. Во-вторых, операции и технологические режимы напрямую влияют на механические и физико-механические характеристики материалов, из которых изготавливается то или иное изделие, а, значит, и на его ТТХ. При этом, с одной стороны, необоснованный выбор технологических параметров может привести к общему снижению уровня ТТХ (не говоря уже о влиянии качества выполнений технологических операций, что относится уже к этапу производства). С другой стороны, для выявления такого влияния требуется на этапе исследований в расчетные модели элементов ББМ закладывать технологические параметры, чтобы путем их варьирования определять влияние на ТТХ.

Развернутое теоретическое обоснование путей определения проектно-технологических решений при ТПП элементов конструкций новых ББМ в настоящее время в общем виде отсутствует. Это обстоятельство определяется тем, что данному аспекту традиционно уделялось недостаточное внимание при разработке новых видов вооружения и военной техники. Кроме того, технологические аспекты изготовления элементов ББМ обладают той особенностью, что их описание сопряжено, с одной стороны, с конструктивным их описанием, а с другой стороны, – с необходимостью учета экономико-организационно-

технологических особенностей того предприятия, на производственных площадях и оборудовании которого планируется их изготовление. Таким образом, эти "технологически-производственные" стороны исследовательских моделей элементов ББМ не являются независимыми: при изменении конструкторской документации (КД) они изменяются соответственно, они также диктуются условиями конкретного производства (УКП) и подстраиваются под него, а, кроме того, само определение рациональных технологических решений (или определение невозможности их рационализации), в свою очередь, может потребовать либо корректировки КД, либо переоснащения (модернизации) УКП.

Все отмеченные обстоятельства формируют новую актуальную и важную научно-практическую проблему разработки и реализации теоретических основ обоснования проектно-технологических решений для обеспечения заданных ТТХ новых ББМ путем исследования влияния на их свойства технологических операций при их изготовлении.

При формировании теоретических основ для решения поставленной проблемы целесообразно привлекать метод обобщенного параметрического моделирования сложных механических систем [6] (см. выше). Этот метод предполагает, что исследуемый объект (например, бронекорпус ВГКМ) идентифицируется неким набором обобщенных конструктивных и технологических параметров ( $P_G$  и  $P_T$  соответственно). Кроме того, любое моделирование сопряжено с введением обобщенных параметров  $P_M$ , определяющих особенности и свойства данной модели. Отсюда следует, что полное обобщенное пространство параметров  $P$  формируется путем объединения подпространств:

$$P = P_G \cup P_T \cup P_M. \quad (8)$$

Если в число рассматриваемых величин ввести режимы боевого применения  $R$  (скорость движения, масса, скорострельность, усилия отдачи и т.п.), то действующие на элементы ББМ  $f$  нагрузки определяются как функции  $R$  и  $P$ :

$$f = f(R, P, t), \quad (9)$$

где  $t$  – время.

Физико-механические процессы, протекающие во время боевого применения ВГКМ в элементах ББМ, в операторном виде представимы следующим образом:

$$L(u, R, P, f, t) = 0. \quad (10)$$

Здесь  $L$  – оператор задачи, например, описывающий динамическое напряженно-деформированное состояние в элементах ББМ, а  $u$  – переменные состояния, например, перемещения точек элементов ББМ вследствие их деформации.

Решение задачи (10) каким-либо способом (например, путем численного моделирования при помощи МКЭ [12]) дает информацию для определения компонент  $T$  и  $H$  тактико-технических характеристик:

$$T = T(u), H = H(u). \quad (11)$$

В качестве таких характеристик могут выступать, например, напряжения (определяют прочность, защищенность) или перемещения (углы наклона подбашенных листов в процессе деформирования от действия усилий отдачи – определяют точность ведения огня из скорострельных артиллерийских систем, которыми оснащаются боевые модули современных ЛБМ) и т.п.

Соотношения (8)–(11) составляют описание задачи анализа физико-механических процессов, протекающих в элементах ББМ при действии различных видов усилий в процессе их боевого применения. В то же время на этапах проектирования

и ТПП новых элементов ББМ требуется решение задачи синтеза, т.е. определения таких обобщенных параметров  $P_G^*$  и  $P_T^*$ , которые обеспечивают либо максимизацию (минимизацию) отдельных характеристик, либо их ограничение:

$$T_i(u, P_G^*, P_T^*) \rightarrow \max(\min), i = 1, \dots, N_1, \quad (12)$$

$$H_j(u, P_G^*, P_T^*) \leq H_j^*, j = 1, \dots, N_2. \quad (13)$$

Основная сложность задачи синтеза (8)-(13) в рассматриваемой постановке состоит в том, что критерии и ограничения (12), (13) оказываются связанными по параметрам  $P_G$ ,  $P_T$ , причем определение рациональных сочетаний  $P_G^*$ ,  $P_T^*$  нельзя осуществлять отдельно, а только взаимосвязано. Кроме того, дополнительной связью  $P_G$ ,  $P_T$  является диктуемый технологией изготовления способ геометрического описания элементов ББМ. В связи с этим этапы формирования геометрической и расчетной моделей оказываются зависимыми не только от  $P_G$ ,  $P_M$ ,  $R$ , но и от технологических параметров  $P_T$  и производственных  $P_{Man}$ . Таким образом, взаимосвязь "технологически-производственного" среза параметров  $P$  с другими аспектами описания исследуемого объекта присутствует не только на этапах собственно синтеза, но и на этапах анализа. Соответственно, в данном случае для решения задачи (8)-(13) требуется адаптация и развитие метода обобщенного параметрического моделирования [1,6] физико-механических процессов в бронекорпусах ЛБМ с целью обоснования рациональных *проектно-технологически-производственных решений* по критерию обеспечения заданных ТТХ.

В связи с этим для решения задачи формирования таких моделей целесообразно привлекать подход, предложенный в работах [1,6] и развитый выше в данной работе. В частности, отмечается, что для решения возникающей проблемы необходимо привлечение подходов, обеспечивающих *единое* моделирование разнородных, разнотипных структур, параметров, характеристик, объединяющихся в различные классы (ТТХ, проектные параметры, режимы боевого применения). Часть из элементов этого множества являются критериальными величинами, часть – варьируемыми искомыми, часть – ограничительными и т.д. При этом в процессе проектирования может происходить "миграция" элементов из группы в группу, само множество и его подмножества могут пополняться или сокращаться [1,6]. В развитие предложенного подхода новым является дополнение множества варьируемых параметров за счет подмножеств  $P_T$  и  $P_{Man}$ . Однако такое пополнение является не механическим "вмонтированием" нового слоя параметров, а представляет собой органическое соединение определяющих проектных и технологических параметров во множество проектно-технологически-производственных параметров, элементы которого находятся в прямой или опосредованной связи друг с другом.

Далее исходная задача трансформируется в задачу описания объекта переменной структуры и состава, с изменяемыми проектными критериями и ограничениями. Наилучшим образом для описания таких объектов, как уже отмечалось, подходит обобщенный параметрический подход [1,6]. Он позволяет формализовать процедуры структурного и параметрического описания проектируемого объекта, нечувствителен к типу, виду элементов формируемого обобщенного параметрического пространства. Более того, он позволяет распространить формальные операции параметрического анализа и синтеза не только на этапы описания, но и на этапы физического, математического и численного моделирования физико-механических процессов в элементах боевых машин.



Важно при этом отметить, что каждый срез из реализуемого набора физико-механических процессов

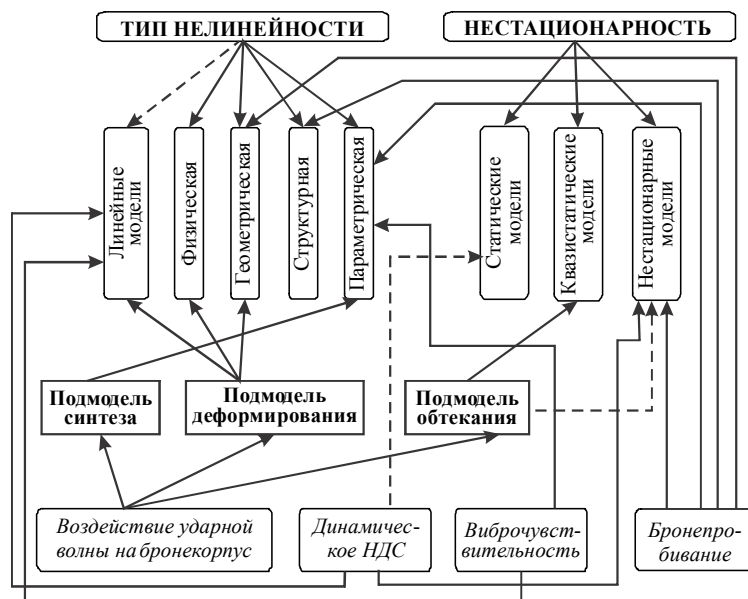


Рис. 1. Структурные особенности математических моделей исследуемых процессов и состояний на примере исследования защищенности бронекорпусов ЛБМ

ства создаваемых математических моделей (описанных далее).

**Математическая модель упругопластического деформирования бронекорпусов при прохождении ударной волны.** Одной из актуальных научно-практических проблем при проектировании и технологической подготовке производства боевых бронированных машин является обоснование таких конструктивных и технологических решений, которые бы в наибольшей степени обеспечивали защищенность их бронекорпусов от воздействия поражающих факторов. Среди данного множества факторов выделяется, в частности, ударная волна. Она осуществляет распределенное по всей поверхности подвижное воздействие на бронекорпус. Численному и экспериментальному исследованию реакции бронекорпуса на данное воздействие посвящены работы [6,13-15]. В ходе проведенных исследований установлено, что для описания реакции корпусов на волновое воздействие требуется существенное совершенствование математических моделей данного процесса, для чего были модифицированы модели газодинамического обтекания ударной волной бронекорпусов и упруго-пластического деформирования элементов корпуса.

Проведенные на примере корпуса машин серии МТ-ЛБ расчеты продемонстрировали, что уже достаточно низкие уровни избыточного давления во фронте ударной волны приводят к появлению пластических деформаций, в первую очередь – в элементах внутреннего силового каркаса. Это заставило обратиться к проблеме концептуальных формулировок проектных критериев защищенности бронекорпусов. Очевидно, что критерий появления первых пластических деформаций таковым быть не может, т.к. в основном корпус сразу после достижения этого состояния сохраняет сопротивляемость внешним нагрузкам, герметичность и форму.

Таким образом, требуется поиск уточненных решений. С этой целью было исследовано поведение материалов элементов бронекорпусов при дальнейшем росте нагрузки. Оказалось, что критерий сохранения герметичности бронекорпуса при получении значительных местных пластических деформаций дает возможность практически вдвое увеличить допустимую величину избыточного давления.

характеризуется своими особенностями физической сути и математических моделей для их описания. В частности, во многом это отражается в характере линейности или нелинейности математической модели и других ее свойств, которые необходимы для адекватного отражения моделируемых процессов, состояний или операций.

На рис. 1 на примере бронекорпусов ЛБМ схематически представлены некоторые учитываемые свой-

В то же время практически не изучен вопрос поведения элементов бронекорпусов при дальнейшем возрастании нагрузки. Эта проблема упирается, с одной стороны, в развитие математических моделей процесса, а с другой, – в модификацию действующих критериев защищенности бронекорпусов. В связи с этим в данной работе уделяется внимание этим задачам, определяя ее цель как разработку методологических основ дальнейших исследований. Ниже они рассмотрены на примере бронекорпусов ЛБМ.

Уровни и критерии защищенности при действии ударной волны на бронекорпуса боевых бронированных машин легкой категории по массе. При анализе быстропротекающих процессов поведение конструкционных материалов ( и броневых панелей из спецсталей, и элементов каркаса из углеродистой стали) становится зависимым от скорости деформирования (рис. 2). В этом случае необходимо рассматривать в качестве определяющей зависимости не кривую « $\sigma - \epsilon$ », а поверхность « $\sigma$ » в координатах « $\epsilon - \dot{\epsilon}$ ». Кроме того, при этом смещаются участки упругого деформирования I, развития упруго-пластических деформаций II и упрочнения III (см. рис. 2).

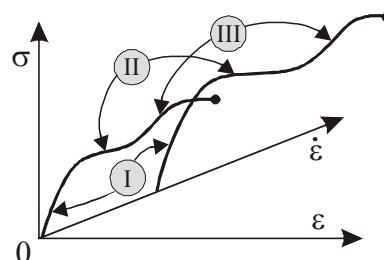


Рис. 2. Характер зависимостей « $\sigma - \epsilon - \dot{\epsilon}$ » при скоростном деформировании

В дополнение к данным обстоятельствам при повышенных скоростях деформирования может изменяться и механизм разрушения различных материалов. Например, могут сменять друг друга критерии предельных состояний по максимальной деформации, по максимальной интенсивности напряжений, по главным максимальным напряжениям и т.п. Первые из них характерны для пластического материала, последний – для хрупкого. Следовательно, следует принимать в расчет не только уровень напряжений, но и вид напряженно-го состояния, т.е. соотношение различных компонент тензора напряжений.

Следует также учитывать и различные свойства и характеристики материалов бронепанелей, а также элементов внутреннего силового каркаса (рисунок 3). Деформирование элементов бронекорпусов в целом происходит совместно, однако уровень действующих напряжений различен. Это обстоятельство дополняется тем, что различные элементы бронекорпусов переходят на разные участки I-III при разных уровнях нагрузок. В первую очередь в упруго-пластическое состояние переходит, как правило, материал элементов внутреннего силового каркаса. Если для его изготовления используется обычная конструкционная сталь, то этот материал может пройти все участки I, II и III вплоть до разрушения, в то время как материал бронепанелей останется на участке I либо только перейдет на начало участка II.

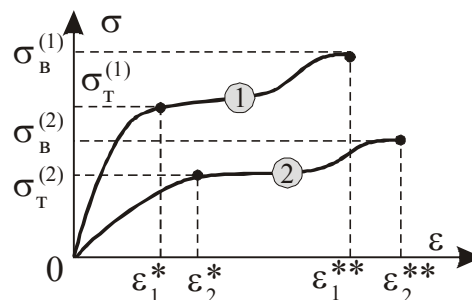


Рис. 3. Диаграммы « $\sigma - \epsilon$ » для материалов бронепанелей 1 и внутреннего силового каркаса 2

Учитывая, что в силу высоких механических свойств материалов бронепанелей они (см. выше), как правило, переходят на участки II, III после материала внутреннего силового каркаса, сформулирована следующая последовательность критериев уровней защищенности, которая используется при проектных численных исследованиях бронекорпусов.

**А. Критерий недопущения пластического деформирования:**

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{(2)} \leq \sigma_{\text{T}}^{(2)}, \tag{14}$$

где индекс «2» относится к материалу элементов внутреннего силового каркаса, а величина

$\sigma_{\text{экв}}$  соответствует актуальному механизму связи « $\sigma - \varepsilon$ » (т.е. эквивалентные напряжения по той или иной теории прочности).

**В. Критерий сохранения герметичности бронекорпуса:**

$$\varepsilon^{(2)} \leq \delta, \tag{15}$$

где  $\varepsilon^{(2)}$  – деформации элементов внутреннего силового каркаса (в основном – их пластическая составляющая), а  $\delta$  – предельно допустимый уровень остаточных деформаций, определяемый условиями сохранения герметичности бронекорпуса и зависящий от конструктивно-го его исполнения.

**С. Критерий сохранения цельности элементов бронекорпуса:**

$$\sigma_{\text{экв}}^{(2)} \leq \sigma_{\text{в}}^{(2)}. \tag{16}$$

Он определяет момент начала разрушения элементов внутреннего силового каркаса (см. рис. 3). После начала этого процесса дальнейший рост нагрузки может привести к лавинообразному процессу потери бронекорпусом какой-либо функциональности. Именно на интервале между выполнением равенства в критерии (15) и до выполнения равенства в критерии (16) происходит ощутимый рост пластических деформаций в материале 2 и могут появляться пластические деформации в материале 1. Для описания поведения всей исследуемой конструкции требуется привлечение и адаптация соответствующего математического аппарата.

*Математические модели для описания процесса деформирования бронекорпусов.* Для адекватного описания процессов деформирования бронекорпусов в зоне больших и развивающихся пластических деформаций предпочтительным является применение теории инкрементального типа [23], связывающей скорости (приращения) деформаций и напряжений при активном нагружении соотношениями

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{1-2\nu}{E} d\sigma \delta_{ij} + \frac{ds_{ij}}{2G} + \frac{\partial\Phi}{\partial\sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial\Phi}{\partial\dot{\varepsilon}_{ij}} d\dot{\varepsilon}_{ij}; \quad i, j = 1, 2, 3. \tag{17}$$

Здесь  $\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ii}$  – шаровая (гидростатическая) часть тензора напряжений;  $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma$  – девиаторная его часть соответственно;  $E, G, \nu$  – модули упругости I и II рода и коэффициент Пуассона соответственно;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера, а  $\Phi(\sigma_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}) = 0$  – поверхность текучести.

Уравнение (17) можно обратить

$$d\sigma_{ij} = \frac{E}{1-2\nu} d\varepsilon \delta_{ij} + 2G de_{ij} + \alpha_{ijkl} d\varepsilon_{kl} + \beta_{ijkl} d\dot{\varepsilon}_{kl}; \quad i, j, k, l = 1, 2, 3. \tag{18}$$

Здесь  $\varepsilon = \frac{1}{3} \varepsilon_{ii}$  – шаровая (гидростатическая) часть тензора деформаций;  $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \delta_{ij} \varepsilon$  – девиаторная часть тензора деформаций, а  $\alpha_{ijkl}, \beta_{ijkl}$  – коэффициенты, получаемые из обращения уравнения (17).

Таким образом, уравнения (18) содержат 3 компоненты: первые два слагаемых соот-

ветствуют упругим деформациям, третье описывает приращение напряжений, вызванное приращением пластических деформаций, а четвертое вызвано изменением скоростей деформаций.

Принимая во внимание существенную зависимость параметров данной поверхности  $\Phi$  от скорости деформирования, зависимость приращения напряжений при активном нагружении

$$\Delta\sigma_T = \Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma' \quad (19)$$

содержит компоненту  $\Delta\sigma_1$ , вызванную приращением деформаций, и  $\Delta\sigma'$ , вызванную приращением скорости деформаций (рис. 4, здесь  $\sigma_+, \varepsilon_+$  – приращения напряжений и деформаций при активном нагружении, а  $\sigma_-, \varepsilon_-$  – приращения напряжений и деформаций при разгрузке).

Учитывая наличие в конструкции больших деформаций, справедлива нелинейная связь компонент тензора деформаций и вектора перемещений  $\mathbf{u}$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}u_{k,j}). \quad (20)$$

Условия равновесия в дифференциальном виде

$$\sigma_{ij,j} + f_i(r, t) = \rho \ddot{u}_i, \quad (21)$$

где  $\rho$  – плотность материала.

Соотношения (20), (21), переписанные в приращениях или скоростях, образуют начально-краевую задачу. Эта система замыкается соотношениями (17), (18), а также соответствующими начальными и краевыми условиями:

$$\mathbf{u}(r, 0) = \mathbf{u}_0(r); \quad \dot{\mathbf{u}}(r, 0) = \dot{\mathbf{u}}_0(r); \quad (22)$$

$$\mathbf{u}(r|_{S_u}, t) = 0; \quad \boldsymbol{\sigma}(r|_{S_\sigma}, t) = \mathbf{p}(r, t). \quad (23)$$

Здесь  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор точек бронекорпуса, а  $t$  – время.

В данном случае в (23) присутствует подвижная нагрузка  $\mathbf{p}(r, t)$ , описывающая действие ударной волны, движущаяся со скоростью  $\mathbf{v}$  в выбранной системе координат. При обтекании бронекорпусов машин возникает нестационарное неравномерное распределение избыточного давления, определение и описания которого подробно описано в работах [6,13-15]. Таким образом, к усложненной модели поведения материала добавляется также и подвижная нестационарная нагрузка. В итоге получена система дифференциальных уравнений, начально-краевых условий и нагрузок, и в результате можно считать завершенным этап формирования математической модели в общем виде.

Решение системы уравнений газодинамического обтекания дает исходные данные для вычисления распределения избыточного давления на бронепанели корпуса в различных

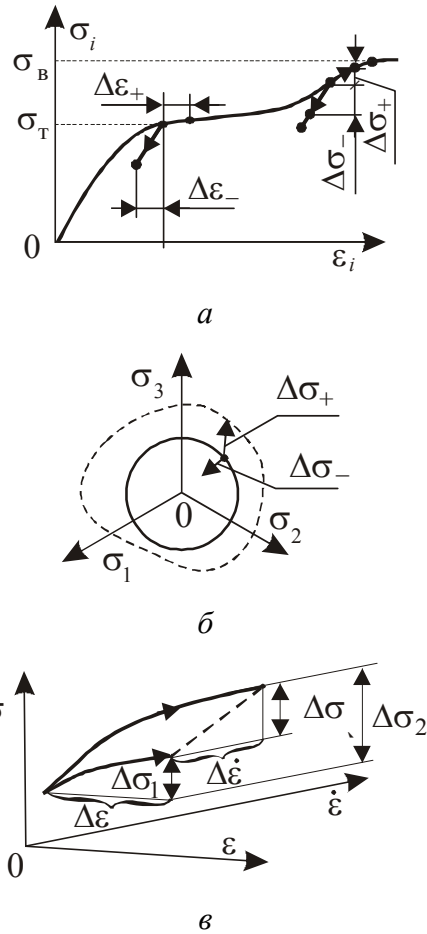


Рис. 4. Связь приращений деформаций и напряжений:  
 а – в координатах интенсивностей напряжений и деформаций « $\sigma_i - \varepsilon_i$ »;  
 б – в пространстве главных напряжений; в – в пространстве « $\sigma - \varepsilon - \dot{\varepsilon}$ »

проекциях. Таким образом, получаем, кроме таких обобщенных и традиционных параметров как форма бронекорпуса, его габариты и размеры бронепанелей, скорость волны и величина избыточного давления во фронте невозмущенной волны, также дополнительный параметр – направление движения потока относительно корпуса машины. Механизм сквозной параметризации, описанный ранее, без принципиальных осложнений позволяет пополнить разрешающую систему соотношений и этим параметром. В результате получаемая разрешающая система уравнений оказывается связанной параметрически. Таким образом, решение, в частности, распределение избыточного давления, тоже становится зависимым от параметров, в том числе и от направления движения ударной волны относительно бронекорпуса. Для иллюстрации такой зависимости можно использовать 3D полидиаграммы, представляющие собой распределения избыточных давлений, наложенные на 3D модель бронекорпуса, причем изменяемые при изменении угла прихода ударной волны.

Полученная подвижная ударно-волновая нагрузка прикладывается к панелям бронекорпуса, вызывая в нем упруго-пластические деформации. Для их описания, как указывалось выше, используется геометрически нелинейные соотношения "деформации – перемещения", а также нелинейные физические соотношения, связывающие напряжения  $\sigma$ , деформации  $\varepsilon$  и скорости деформирования материала  $\dot{\varepsilon}$ . В разрезе « $\sigma - \varepsilon$ » получаем зависимости, подчиняющиеся теориям течения инкрементального типа, однако при этом важно учесть фактор влияния скорости протекания процесса. В некоторых случаях, например [16,17], предел прочности сталей существенно увеличивается. Поэтому данный фактор необходимо учитывать в формировании системы разрешающих соотношений. Таким образом, по типу системы разрешающих уравнений имеем физически и геометрическую нелинейность. С точки зрения параметрических зависимостей в качестве варьируемых параметров можно принять распределение свойств материалов по зонам вблизи сварных швов и вдали от них (бронепанели), в зонах соединений и на удалении от них (элементы силового каркаса), а также свойства собственно материала сварных швов.

Известно множество зависимостей, которым подчиняются механические свойства различных материалов. Учитывая, что в данных исследованиях важно отразить именно варьируемость этих зависимостей, то такую возможность предложенный в работе параметрический подход обеспечивает.

В результате для описания процессов воздействия ударной волны на бронекорпус получаем систему геометрически и физически нелинейных соотношений. Для их решения требуется использование численных методов, например, МКЭ [12,23].

**Математическая модель бронепробивания.** Рассмотрим процесс бронепробивания легкобронированных машин. Для анализа процессов бронепробивания используется множество различных методов и подходов. Одна группа методов ориентирована на исследование самого процесса соударения ударника (снаряда) с защитной плитой или полупространством. При этом записывается полная система уравнений [18]: уравнение состояния; модель для описания зависимости предела текучести от достигнутого уровня пластических деформации, скорости пластических деформаций, плотности материала и температуры; модель формирования разрушений в структуре материала; модель, учитывающая влияние разрушений на предел текучести и модуль сдвига.

Данная система уравнений в принципе аналогична системе уравнений для упруго-пластического деформирования, однако, поскольку скорости процессов в данном случае гораздо выше, а основным физическим процессом является нарушение сплошности материала, сама структура соотношений гораздо сложнее, причем добавляется новый вид нелинейности – структурная.

Так, при использовании Лагранжева подхода получаем систему уравнений, приведенную выше. В основе подхода лежат уравнения сохранения массы, количества

движения и внутренней энергии, а также замыкающее эту систему определяющее соотношение. Но в целом тенденции изменения характеристик бронепробития могут быть достаточно точно описаны более простыми моделями.

В связи с этим предлагается в развитие подхода, предложенного в работе [19], привлечь в качестве базовой модели соотношения Жакоб-де-Марра, а на этой основе получить множество 3D диаграмм бронестойкости  $S(p)$ . Элементы этого множества диаграмм соответствуют поверхностям  $S$  в пространстве, соответствующие зонам поражения теми или иными снарядами при заданных параметрах  $p$ . Принимая во внимание, что при варьировании  $\Delta p$  поверхность  $S(p)$  трансформируется в поверхность  $S(p + \Delta p)$ , важно получить оценку изменения поверхности, а затем путем варьирования частью проектно-технологических параметров  $P_{var}$  минимизировать снижение характеристик бронезащиты:

$$V^-(S(p), S(p + \Delta p)) \rightarrow \min. \quad (24)$$

Здесь  $V^-$  – объем пространства вне поверхности  $S(p)$ , ограниченный поверхностью  $S(p + \Delta p)$ . Можно поставить также обратную задачу

$$V^+(S(p), S(p + \Delta p)) \rightarrow \max, \quad (25)$$

где  $V^+$  – объем пространства внутри поверхности  $S(p)$ , но внутри  $S(p + \Delta p)$ .

На рис. 5 представлено некоторое произвольное сечение 3D диаграммы. Естественное условие непрерывности

$$\lim_{\Delta p \rightarrow 0} |V^+(p, \Delta p) - V^-(p, \Delta p)| = 0 \quad (26)$$

дает предпосылки ставить и задачи (25), (26), и любые их комбинации  $P_{var}^* : (\gamma^+ V^+ - \gamma^- V^-) \rightarrow \max$ , где  $\gamma^+, \gamma^-$  – некоторые неотрицательные весовые коэффициенты  $(\gamma^+ + \gamma^-) = 1$ .

Поскольку для бронекорпуса 3D диаграмма бронестойкости представляет собой объединение лепестков от всех бронепанелей, то при варьировании какого-либо из параметров  $P_{var}$  относительно номинального значения получается некоторый набор поверхностей  $S$ , соответствующий множеству наборов  $P_{var}$ . Этот набор можно назвать полидиаграммами  $S(P_{var})$ . Если имеется некоторый допустимый разброс параметров  $P_{var}$ , вызванный особенностями технологических процессов изготовления (например, глубина обезуглероживания или обезлегирования и т. п.), то задача может ставиться в непревышении уменьшений характеристик бронезащитенности от номинальных при варьировании  $P_{var}$  в допустимом диапазоне  $(\gamma_1 W^+ - \gamma_2 W^-) \leq \Delta, \Delta p \leq \varepsilon$  Здесь  $W^+, W^-$  – объединение всех  $V^+(P), V^-(P)$ ,  $\Delta, \varepsilon$  – заданные величины отклонений.

Для более адекватного моделирования взаимодействия индентора (снаряда) с преградой (бронепанелью) требуется применение полной динамической постановки задачи с разрушением (см. соотношения (24)-(26)), что возможно с привлечением МКЭ.

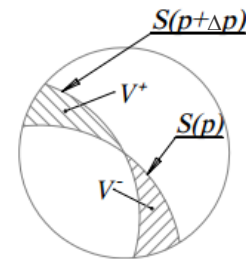


Рис. 5. Сечения диаграмм бронестойкости плоскостью объемов  $V^-, V^+$

**Динамическое напряженно-деформированное состояние бронекорпусов при действии усилий отдачи.** Бронекорпуса БМ представляют собой сложные пространственные конструкции, находящиеся под действием различных силовых воздействий, в том числе – реактивных усилий отдачи, действующих со стороны скорострельных артиллерийских систем, от подвески, от инерционных сил, возбуждаемых самим бронекорпусом, а также системами и агрегатами, на и в нем расположенными. Наиболее значимыми из этих усилий являются усилия отдачи, особенно применительно к ЛБМ, калибр и скорострельность пушечного вооружения которых имеют постоянную тенденцию к росту, а бронекорпуса являются тонкостенными конструкциями. В связи с этим одной из актуальных задач, составляющих проблемный ряд в обеспечении защищенности ЛБМ, является анализ динамического НДС бронекорпусов при действии усилий отдачи. Учитывая ярко выраженный динамический характер действующих усилий отдачи, а также значительную податливость бронекорпусов, необходимо в уравнениях состояния учесть и временные распределения усилий, и инерционные слагаемые. Отталкиваясь от системы уравнений механики сплошной среды

$\{\sigma_{ij} + f_i - \rho \ddot{u}_i = \psi(\dot{u}); \sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}; \varepsilon_{kl} = 1/2(u_{i,j} + u_{j,i})\}$ , дополним их начальными и краевыми условиями:  $u|_{S_u} = 0; \sigma_{ij} u|_{S_\sigma} = F_i(r, t), u(r, 0) = u_0(r); \dot{u}(r, 0) = \dot{u}_0$ . Здесь  $\rho$  –

плотность,  $\sigma, \varepsilon, u$  – напряжения, деформации (тензоры) и перемещения (вектор). Тогда получаемая начально-краевая задача может решаться путем ее сведения к вариационным проблемам. Кроме того, для тонкостенных конструкций можно использовать соответствующие модели пластин, стержней и оболочек. В результате разрешающие соотношения определяются не в трехмерной области, а на множестве срединных линий и поверхностей. В итоге, применяя процедуру конечно-элементной аппроксимации к уже получаемым соотношениям, разрешающую систему уравнений можно записать в виде:  $M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = \varphi(t)$ . Здесь  $x$  – вектор искомых узловых параметров,  $M, C, K$  – матрицы масс, демпфирования и жесткости соответственно,  $\varphi$  – вектор узловых усилий. В этих соотношениях силы получаются из компонент объемных сил  $X$ , поверхностных  $F$ , демпфирующих  $\psi$ . Матрица масс отражает инерционные свойства (плотность  $\rho$ ), матрица жесткости  $K$  – упругие свойства, формируемые в т.ч. компонентами тензора модулей упругости  $C_{ijkl}$ .

Учитывая, что в результате построения моделей исследуемых объектов, которые определяются параметрами  $p$ , все компоненты ( $M, C, K, \varphi$ ) системы соотношений МКЭ станут параметрически зависимыми от варьируемых параметров  $p_{var}$ , из них данная система обыкновенных дифференциальных уравнений дает при конкретно заданных  $p_{var}$  временное распределение  $x(t)$ , а с учетом возможного варьирования  $p_{var}$  –  $x(p, t)$ . По аппроксимационным соотношениям МКЭ получаем пространственные распределения  $u(p, r, t), \varepsilon(p, r, t), \sigma(p, r, t)$ , где  $r$  – пространственная координата,  $t$  – время,  $p$  – параметры.

Имея в распоряжении данные пространственно-временные распределения и

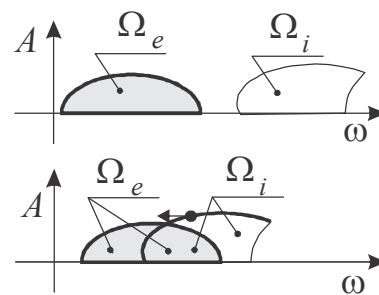


Рис. 6. Тенденции изменения спектров возмущающих нагрузок  $\Omega_e$  и собственных частот колебаний  $\Omega_i$  для бронекорпусов боевых машин тяжелой (вверху) и легкой категории по массе (внизу)

параметрические зависимости, можно ставить и решать последующие задачи анализа, параметрического анализа и синтеза.

**Анализ чувствительности вибрационных характеристик к варьированию проектно-технологически-производственных параметров.** Возбуждение динамических процессов, приводит к перераспределению напряжений и деформаций в исследуемой конструкции. В то же время существуют особые, резонансные режимы нагружения, при наступлении которых реализуются нарастающие во времени колебательные процессы. Скорость нарастания перемещений и напряжений во многом зависит от уровня демпфирования в системе и близости возбуждающих частот к собственным частотам колебаний, это с одной стороны. С другой стороны, важна степень возбужденности той или иной собственной формы колебаний внешней нагрузкой.

В отношении бронекорпусов, особенно легкобронированных машин, задача отстройки от резонансных режимов особенно актуальна. Это объясняется сближением и частичным перекрытием спектром частот возбуждающих сил спектра собственных частот колебаний. На рис. 6 приведены эти тенденции в условном изображении зависимости амплитуд  $A$  от частот  $\omega$ . Показано, что для машин тяжелой категории по массе более характерным является сильное превышение нижнего уровня спектра собственных частот колебаний  $\Omega_i$  над верхним уровнем спектра частот возбуждения  $\Omega_e$ . Если же и происходит их некоторое перекрытие, то на верхних частотах возбуждения, для которых возбудимость низких форм собственных колебаний невысока. Таким образом, требование обеспечения пассивной защищенности у тяжелых машин заведомо покрывает проблемы вибровозбудимости.

Наоборот, для ЛБМ такая проблема порождается как раз тонкостенностью, с одной стороны, и установкой скорострельных артиллерийских систем – с другой. Темп их стрельбы может достигать сотен и даже десятков сотен выстрелов в минуту, что обуславливает наличие возбуждающих частот от единиц до десятков Герц. Кроме того, в спектре временных распределений внешних сил присутствуют и частоты, кратные частоте осуществления выстрелов. Следовательно, необходимо учитывать также частоты до 100 Гц и выше (т.е. гораздо правее, чем на частотной оси для тяжелых машин). При этом избежать ситуации перекрытия в принципе невозможно, т.к. собственные частоты колебаний тонкостенных конструкций по сравнению с массивными элементами тяжелых машин имеют тенденцию к снижению (т.е. смещению влево, см. рис. 6). В результате возникает проблема отстройки собственных частот колебаний бронекорпусов  $\omega_i$  от частот возбуждения  $\omega_s$  за счет варьирования некоторых проектно-технологически-производственных параметров:

$$|\omega_i(p) - \omega_s^*| \geq \Delta_{is}, \quad i = 1, 2, \dots; s = 1, 2, \dots, N_e,$$

где  $\Delta_{is}$  – некоторый порог отстройки из условия ограничения амплитуды  $A$  (рис. 7).

Проблема усложняется тем, что с варьированием параметров  $p_{var}$  сложным образом изменяются жесткостные и инерционные характеристики бронекорпусов как конструкций с распределенными параметрами. В свою очередь, это приводит к тому, что разные частоты из спектра собственных частот колебаний по-разному реагируют на изменение отдельных параметров. В результате при варьировании множества частот в каких-то своих диапазонах изменения собственные частоты совершают сложные "миграции": часть из них растет, часть – уменьшается, некоторые практически неизменны по сравнению с некоторым "базовым"

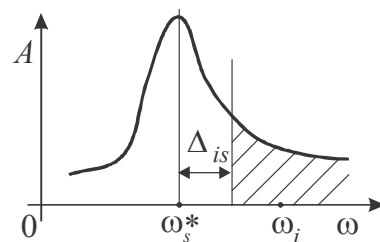


Рис. 7. К задаче отстройки от резонансных режимов



варианта бронекорпуса с набором "номинальных" параметров. Более того, картина может поменяться при изменении набора варьируемых параметров, причем неочевидным и труднопрогнозируемым образом.

Таким образом, получаем в итоге достаточно сложную задачу обоснования параметров бронекорпуса по критерию отстройки от резонансного режима, представляющую собой в общей постановке задачу нелинейного программирования. Для ее решения возможно применение разнообразных методов оптимизации. В свою очередь это предполагает неоднократное решение отдельных задач анализа.

Определение динамических, также как прочностных и жесткостных характеристик элементов машиностроительных конструкций [20-22], в настоящее время осуществляется, как правило, при помощи численных методов. В частности, особое и преимущественное положение среди них занимает метод конечных элементов [12,23]. Он обладает многими положительными качествами, в том числе возможностью моделировать НДС, собственные частоты и формы колебаний (СЧФК) сложных машиностроительных конструкций. При этом не встречаются принципиальных затруднений ни учет сложной геометрической формы, ни неоднородностей свойств материалов или их анизотропии, а также других факторов. В классическом случае для любой из поставленных задач по разработанным технологиям [12,23] осуществляется дискретизация математической модели или состояния объекта исследований, формирование системы разрешающих уравнений и ее решение. В результате определяются, например, искомые поля распределений компонент НДС или, как в рассматриваемом случае, наборы СЧФК и т. п.

Однако в традиционном случае получается только единичный вариант расчета той или иной конструкции с изначально заданными параметрами (геометрическая форма и размеры, физико-механические свойства материалов, нагрузки и т. д.). В развитие этих возможностей многие программные продукты (ANSYS Workbench, NX Nastran, Abaqus и т.п.) [www.ansys.com, www.plm.automation.siemens.com, www.3ds.com] оснащаются инструментами параметрического анализа и синтеза исследуемых конструкций по критериям их прочности, жесткости или динамических свойств. Эти инструменты реализуют процедуры типа "черного" или "белого (прозрачного)" ящика. Речь идет о вычислении по итогам некоторого количества расчетов СЧФК зависимостей динамических, прочностных или жесткостных характеристик от изменяемых параметров исследуемого объекта либо о его локальной чувствительности к варьированию этих параметров. Это дает возможность проводить процедуры синтеза или хотя бы оценивать эффективность влияния различных изменений параметров на интересующие свойства проектируемой конструкции.

Необходимо отметить, что приемы с применением "черного" и "белого" (прозрачного) ящиков имеют определенные недостатки. В первом случае это необходимость проведения множества СЧФК, по результатам которых определяются либо значения критериальных функций, либо их производных по тем или иным параметрам. Во втором случае определяется массив характеристик чувствительности, то есть "градиент" функции отклика, однако определенный только в одной точке параметрического пространства, что зачастую не отражает тенденций изменения критериальных функций во всем диапазоне параметров, от которых они зависят.

В связи с этим представляется целесообразным использование технологии "серого" ящика, то есть привлечение в ходе исследований дополнительной информации о характере поведения той или иной критериальной функции. В частности, представляет интерес определение зависимости динамических, а также прочностных и жесткостных характеристик бронекорпусов как тонкостенных элементов машиностроительных конструкций от распределений толщин их бронепанелей по различным проекциям конструкции, причем с учетом варьирования этих распределений. С этой целью целесообразно соединить возможности конечно-элементного анализа, с одной стороны, и достаточно простого алгоритма аналитиче-

ского вычисления результатов расчета СЧФК при произвольном варьировании толщин (с использованием ограниченного числа базовых расчетов), – с другой. Данный подход позволяет сводить задачу оптимизации в общей формулировке к последовательности более простых задач.

Получаем такую постановку задачи, которая первым этапом предполагает определение чувствительности динамических характеристик к изменению параметров на примере толщин панелей бронекорпусов и поперечных сечений элементов внутренней структуры усиления. При этом полагается, что уже осуществлен переход от континуальной к дискретной формулировке задачи. Иными словами, получаем уже дискретизированную систему с обобщенными координатами  $x = \{x_1, \dots, x_{N_e}\}^T$ , для описания свободных движений которой можно применить технологию формирования уравнений Лагранжа II рода:

$$d/dt(\partial T / \partial \dot{x}_i) - \partial \Pi / \partial x_i = 0; \quad T = \dot{x}^T M \dot{x}; \quad \Pi = x^T K x, \quad i = 1, \dots, N_e,$$

где  $T, \Pi$  – кинетическая и потенциальная энергии системы как функции обобщенных скоростей и координат соответственно, определяемые через матрицы масс  $M$  и жесткости  $K$ . Предполагая для малых колебаний независимость  $K, M$  от  $\dot{x}, x$ , уравнения малых колебаний можно представить в виде:  $M \ddot{x} + Kx = 0$ . Частные решения этого уравнения имеют вид:  $x = \lambda \sin \omega t$ , где  $\lambda$  – некоторая форма колебаний, тогда из него получаем

$$(M - \omega^2 K) \cdot \lambda = 0. \tag{27}$$

Если в качестве способа дискретизации выбрать МКЭ [12], то система уравнений (27) сводится к анализу свойств конечно-элементных моделей (КЭМ) бронекорпусов.

Таким образом, исследуется задача конечно-элементного анализа собственных частот и форм колебаний пластинчато-стержневых пространственных конструкций, моделируемых Shell/Plate-элементами. При этом распределение толщин по Shell-"скелету" конечно-элементного ансамбля является изменяемым. Эта изменяемость может быть виртуальной (например, вследствие изменения распределения толщин различных элементов конструкции на этапе проектных разработок исходя из тех или иных соображений), согласованной (как пример – на этапе технологической подготовки производства изделия вследствие компромиссных согласований между проектантами и технологами), вынужденной (на этапе производства вследствие разброса толщин поставляемого на предприятие-изготовитель материала), случайной (в ходе эксплуатации в условиях воздействия множества факторов стохастического характера: коррозионное деградирование, механический износ, наплавка и наварка материала при ремонте и т. п.). В любом случае все эти процессы можно с точки зрения влияния на КЭМ исследуемого объекта характеризовать следующим образом: на начальном этапе имеется некоторый ее базовый (начальный) вариант с установлением номинального распределения толщин; на последующих этапах производится незначительное изменение номинальных толщин в сторону их уменьшения или увеличения (либо целенаправленное варьирование, либо детерминированное или случайное уменьшение/увеличение).

С учетом отмеченных обстоятельств задачи определения собственных частот и форм колебаний при помощи МКЭ можно сформулировать в общем виде следующим образом:

$$Det(K(h) - \omega^2 M(h)) = 0. \tag{28}$$

Здесь  $K(h), M(h)$  – матрицы жесткости и масс конечно-элементного ансамбля, зависящие от распределения толщин, задаваемого массивом  $h$  толщин  $h_k$  ( $k = 1, \dots, N_e$  – номера конечных элементов);  $f(h)$  – вектор внешних нагрузок, которые также могут быть зависимыми от толщин конечных элементов (КЭ)  $h_k$  (например, весовые или инерционные нагрузки);

$\omega^2$  – іскомые собствение частоты колебаний.

Рассмотрим, не снижая общности, процесс изменения толщин  $h_k$  на примере варьирования толщины поверхностных слоев элементов конструкции бронекорпуса в сторону их уменьшения:

$$h_k = h_k^0(1 - \alpha_k), k = 1, \dots, N_e. \quad (29)$$

В выражении (29)  $h_k^0$  – массив номинальных толщин, а  $\alpha_k \in [0;1)$  – безразмерный коэффициент (интенсивность утонения). Распределение  $\alpha_k$  задает "карту утонения", т.е. распределение интенсивностей утонения по Shell-"скелету" КЭ ансамбля. Тогда, учитывая, что  $\alpha_k \ll 1$ , можно поставить задачу следующим образом: как при варьировании распределений интенсивности утонения  $\alpha = \{\alpha_k\}^T$  изменяется решение задачи (28) в окрестности  $\alpha = 0$ , то есть определение зависимостей

$$\omega_i^2 = \omega_i^2(\alpha), \quad (30)$$

где  $i=1,2,\dots$  – номера собственных частот колебаний, являющихся корнями уравнений (28).

Другими словами, предлагается установить параметрическую зависимость изменений решений задач (28) при малом варьировании (т.е. изменении интенсивностей утонений/утолщений) по сравнению с номинальным вариантом конструкции (в данном случае – исходным). Спектр собственных частот  $\omega_i$ , как отмечалось, определяется как набор положительных корней (28). Естественно, что базовыми возмущаемыми величинами являются матрицы  $K, M$ . Рассмотрим их изменения и влияния на решения (28) на примере утонения элементов исследуемого объекта. Тогда введем в рассмотрение операцию сборки  $O$ , которая по координатам узлов (т.е. матрице координат  $U$ ) и матрице элементов  $C$  (т.е. списку узлов, входящих в образуемые ими КЭ) производит формирование матриц  $K$  и  $M$ :

$$K = O(k^e), e = 1, \dots, N_e, \quad M = O(m^e), e = 1, \dots, N_e, \quad (31)$$

где  $k^e, m^e$  – матрицы жесткости и масс отдельных конечных элементов, число которых в ансамбле  $N_e$ .

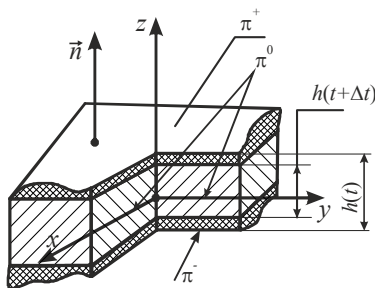


Рис. 8. Утонение пластинчатого конечного элемента:

$\pi^0$  - срединная плоскость;

$\pi^+, \pi^-$  - верхняя и нижняя  
лицевые поверхности;  $h$  - текущая толщина в момент времени  $t, t + \Delta t$

Операция  $O$  как бы "наслаивает" в соответствующих ячейках матриц  $K$  и  $M$  влияние от всех конечных элементов. Проанализируем влияние изменений свойств отдельных элементов на компоненты  $k^e, m^e$ , а затем, проведя операцию сборки, оценим общий эффект на матрицах  $K, M$ .

Рассмотрим, следуя работам [20,24], подход к решению задачи. В частности, как следует из этой работы, элементы матриц жесткости и масс будут состоять из двух компонент:

$$k_{ij} = k_{il}^{(0)} - \alpha^e k_{il}^{(e)}, \quad m_{il}^{(e)} = m_{il}^{(0)} - \alpha^e m_{il}^{(e)}, \quad (32)$$

т.е. текущее состояние определяется в зависимости от коэффициента  $\alpha^e = \alpha^e(t)$ . При этом данный коэффициент может меняться от узла к узлу, может быть разным для масс и жесткостей в одном узле. Важной особенностью является то, что при  $\alpha \ll 1$  компоненты матриц  $K$  и  $M$  состоят из 2-х слагаемых: первая соответствует компо-

нентам "номинальных" матриц  $K, M$  (т.е.  $K(0), M(0)$ ), а вторая образуется путем операции сборки из матриц, все компоненты которых являются линейными комбинациями "номинальных" матриц с малыми коэффициентами  $\alpha$ . Тогда:

$$K(\alpha) = K_0 - K'_0, \tag{33}$$

$$M(\alpha) = M_0 - M'_0. \tag{34}$$

Здесь в  $K_0, M_0$  сосредоточены компоненты, не зависящие от  $\alpha$ , а в  $K'_0, M'_0$  – зависящие от них линейно.

Так, при рассмотрении пластинчатых Shell-элементов традиционно их НДС представляется в виде комбинации плоского НДС и изгиба (на рис. 8 соответствуют плоскостям  $xu$  и направлению  $z$ ). Первое предполагает, что компоненты  $M$  и  $K$  прямо пропорциональны толщине конечного элемента (КЭ)  $h$ . Если при утонении взять коэффициент  $\alpha$  как степень изменения  $h$  по сравнению с номинальным (исходным) значением  $h_0$ , то есть  $h = h_0(1 - \alpha)$ , то автоматически для плоского напряженного состояния выполняются все соотношения (32)-(34).

Для изгибной компоненты НДС коэффициенты матрицы масс также пропорциональны  $h$ , и в части их представления справедливы соотношения (32)-(34). Коэффициенты же матрицы жесткости пропорциональны  $h^3$ , и при малых  $\alpha$  справедливо примерное равенство:

$$k_{**}^e \approx k_{**}^{e0}(1 - 3\alpha^e). \tag{35}$$

Таким образом, сохраняется справедливость выражения (33). Кроме того, в исследуемой конструкции кроме Shell-элементов могут присутствовать также стержневые конечные элементы (например, детали силового каркаса). При формировании матриц жесткости и масс стержневых (Beam) конечных элементов (рис. 9) обычно выделяются слагаемые от растяжения-сжатия, изгиба и кручения. Как показано в работе [20], при использовании МКЭ для определения СЧФК, компоненты матриц  $M$  и  $K$  выразятся через компоненты  $M_0, K_0$ :

$$k_{**}^e = k_{**}^{e0}(1 - n\alpha^e); \tag{36}$$

$$m_{**}^e = m_{**}^{e0}(1 - n\alpha^e). \tag{37}$$

Величина  $n$  зависит от того, какой степени свободы соответствует та или иная компонента  $K, M$ , а также от

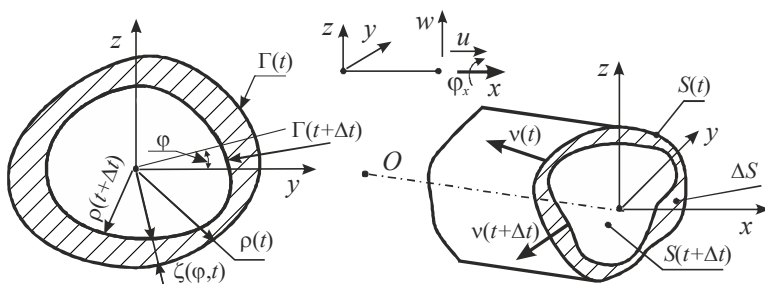


Рис. 9. Утонение поперечного сечения стержня  $\alpha = \Delta F / F^0 = (F^0 - F(t)) / F^0$

способа утонения (варьирования) материала в сечении того или иного КЭ. Важно то, что и для стержневых (Beam) элементов при малых  $\alpha$  справедливы соотношения (32), (35)-(37). При этом параметр  $\alpha$  может для Beam-элементов определять степень изменения площади от "номинальной"  $F^0$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что и для пластинчатых, и для стержневых конечных элементов: соотношения (32) здесь справедливы относительно тенденций изменения компонент матриц

жесткости и масс, а (33), (34) – относительно вида представления  $M(\alpha)$ ,  $K(\alpha)$ .

*Изменение собственных частот колебаний конструкции.* Обращаясь к задаче анализа спектра частот собственных колебаний (28), рассмотрим сначала задачу поиска квадрата первой (низшей) собственной частоты как абсолютного минимума функции Рэлея  $R$ :

$$\omega_1^2 = \min R = \min \left\{ \sum K_{ij} y_i y_j / \sum M_{ij} y_i y_j \right\}. \quad (38)$$

Здесь  $K_{ij}$ ,  $M_{ij}$  – компоненты матриц  $K$  и  $M$ , а  $y_k$  – компоненты пробных распределений, приближающих первую собственную форму колебаний  $A$  с компонентами  $A_k$ .

Находя достаточно хорошее приближение  $\omega_1^2(\alpha)$ , можно использовать то обстоятельство [25], что сама собственная частота, определяемая по функции Рэлея, при изменении формы  $A$  отклоняется от точного значения незначительно. В силу этого при малых  $\alpha$  можно не делать различий между формами  $A(0)$  и  $A(\alpha)$ . Тогда

$$\omega^2(\alpha) = \omega_0^2 \left( 1 - \sum_{i,j} K'_{ij} A_i A_j / \sum_{i,j} K^0_{ij} A_i A_j \right) / \left( 1 - \sum_{i,j} M'_{ij} A_i A_j / \sum_{i,j} M^0_{ij} A_i A_j \right), \quad (39)$$

где  $\omega_0^2 = \sum_{i,j} K^0_{ij} A_i A_j / \sum_{i,j} M^0_{ij} A_i A_j$ , можно сделать вывод, что по сравнению с неутоненной конструкцией нижняя собственная форма колебаний либо растет, либо уменьшается, либо остается неизменной в зависимости от скоростей роста числителя и знаменателя (38). Переписав для малых  $\alpha$  последнее выражение в виде:

$$\omega^2(\alpha) \approx \omega_0^2 (1 - \delta_K)(1 + \delta_M), \quad (40)$$

где  $\delta_K$ ,  $\delta_M$  – отношения значений билинейных форм, вычисляемых для возмущений, вызванных утонением, и для базового неутоненного варианта (соответственно, для матриц  $K$  и  $M$ ), можно принять

$$\omega^2(\alpha) \approx \omega_0^2 (1 - \delta_K + \delta_M); \quad \omega(\alpha) \approx \omega_0 (1 - (\delta_K - \delta_M) / 2). \quad (41)$$

Учитывая, что  $\delta_K$ ,  $\delta_M$  линейно зависят от параметров  $\alpha$ , то и  $\omega^2$ , и  $\omega$  имеют приближенно линейную зависимость от степени утонения элементов машиностроительных конструкций. При этом, поскольку для определения более высоких частот колебаний с использованием функции Рэлея ищется ее условный экстремум на формах, ортогональных предшествующим, то вместо задачи минимизации получаем последовательность минимаксных задач. При этом, однако, вид самой функции Рэлея сохранится, и все выкладки сохранятся теми же. При малых  $\alpha$  останутся справедливыми те же оценочные соотношения (40), (41), однако входящие в них величины  $\delta_K$ ,  $\delta_M$  изменятся, в силу чего может измениться и тенденция "миграции" той или иной частоты в спектре исследуемого объекта.

Полученные соотношения дают возможность построить линеаризованные аппроксимационные зависимости

$$\omega(p_1(1 - \alpha_1), \dots, p_i(1 - \alpha_i), \dots, p_N(1 - \alpha_N)) = \omega_0 - \sum_j \alpha_j \cdot \frac{\omega(\alpha_j^*) - \omega_0}{\alpha_j^{\wedge}}. \quad (42)$$

Здесь  $\alpha_{(j)}^* = \{0, \dots, \alpha_j^{\wedge}, 0, \dots, 0\}^T$  – набор нулевых  $\alpha$  с ненулевым изменением на предель-

ную величину возможного варьирования  $j$ -го компонента этого массива  $\alpha_j^\wedge$ ;  $\omega(\alpha_{(j)}^*)$  – точное решение задачи определения собственных частот колебаний бронекорпуса (следуя работе [26], данные решения называются "реперными").

Полученное представление дает возможность применить "конечно-разностные" значения чувствительностей вместо "дифференциальных", т.е. вместо приближения (согласно теории возмущений) поверхности отклика 1 (рис. 10) касательной 2 предлагается ее аппроксимировать пучком секущих 3.

В отличие от [26], в данной работе предлагается, во-первых, для случая многомерного параметрического пространства, использовать для аппроксимации не гиперплоскости, а набор лепестков по каждому гиперквadrantu в системе координат  $\alpha_1 \dots \alpha_N$ , причем изменять набор "реперных" решений для формирования характеристик чувствительности при изменении базовой точки  $B$  (рис. 11).

Получается, таким образом, "плавающий" набор реперных решений, т.е. поверхности отклика изменяют свою конфигурацию при переходе, например, из точки  $B_1$  в точку  $B_2$  (см. рис. 11). Естественно, что такую операцию уместно осуществлять не на каждом шаге уточнения решения, а через некоторое их количество. Этим самым повышается степень "локальной прозрачности серого ящика".

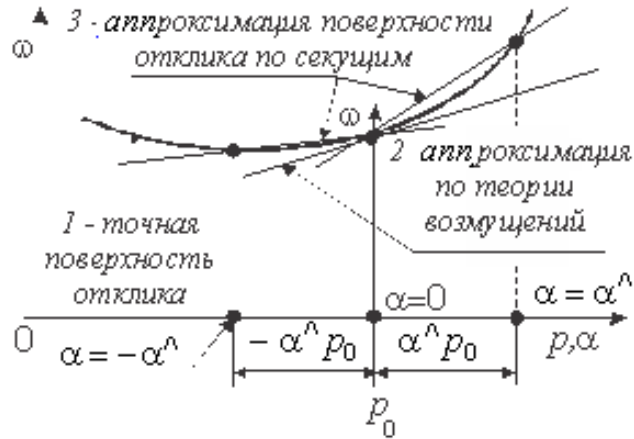


Рис. 10. Аппроксимация поверхности отклика

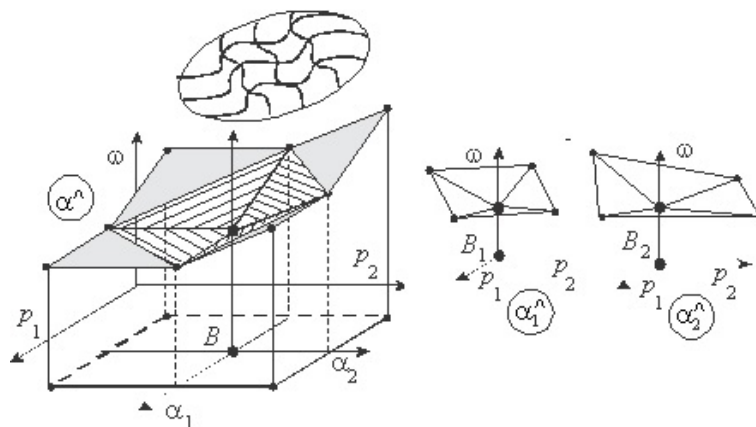


Рис. 11. К аппроксимации поверхности отклика с "плавающим" набором реперных решений

Таким образом, предложенный прием отличает данный метод аппроксимации от использованного в [26] еще и тем, что изменяется не только текущее положение точки  $B$  (т.е. набора номинальных параметров  $P$ , в окрестности которых осуществляется аппроксимация поверхности отклика), но и величины шага  $\alpha^\wedge$ . В результате в (42) эти величины являются

варьируемыми, тогда как в [26] они – константы. Другими словами, степень прозрачности увеличивается в той части "серого ящика", куда перемещается текущее итерационное приближение искомого решения задачи синтеза.

Для решения полученной задачи отстройки, таким образом, можно применить алгоритмы линейного программирования, т.к. и целевая функция, и ограничения приобретают на каждом этапе линейный вид. При этом предложенные усовершенствования при формировании аппроксимационных представлений функции отклика (42) еще больше повышают точность вычислений.

**Выводы.** В работе поставлены и решены следующие задачи.

1. Разработка нового общего подхода к проектно-технологически-производственному обеспечению ТТХ боевых бронированных машин путем обоснования их параметров по критериям защищенности, прочности, жесткости и вибровозбудимости на основе развития метода обобщенного параметрического описания сложных механических систем.

2. Совершенствование математических моделей физико-механических процессов, происходящих и реализуемых в элементах ББМ при действии поражающих факторов в условиях эксплуатации и боевого применения с интеграцией их обобщенного параметрического описания и установления через уравнения состояния связи проектно-технологически-производственных параметров с режимами боевого применения и ТТХ боевых машин.

3. Формирование частных задач моделирования действия на элементы ББМ подвижной ударно-волновой нагрузки, кинетических боеприпасов, динамических нагрузок, а также об отстройке от резонансных режимов возбуждения.

Анализ полученных и описанных в работе результатов дает основание сделать следующие выводы.

1. В работе предложен новый подход к решению задач синтеза проектно-технологических решений, обеспечивающих заданные составляющие комплекса ТТХ. Он состоит в развитии метода обобщенного параметрического моделирования процессов и состояний элементов ББМ путем дополнения параметрического пространства технологическими режимами и условиями производства, оказывающими существенное влияние на достижение тех или иных конструктивно заложенных ТТХ в реальном изделии – ББМ. При этом обозначены пути решения данной задачи – сбалансирование проектных, технологических и производственных решений, учет физико-механических процессов и состояний, достижение решений, слабо чувствительных к варьированию различных параметров. На этой методологической основе увязаны режимы боевого применения, проектно-технологически-производственные решения и ТТХ. В целом разработанный подход охватил все основные стороны жизненного цикла изделия на основе единого описания, которое, в отличие от предшествующих исследований, включает и производственно-технологические параметры, также влияющие в конечном счете на реально достигаемые ТТХ ЛБМ.

2. В работе проведено внедрение обобщенного параметрического моделирования в математическую модель протекающих физико-механических процессов и реализуемых состояний в элементах ББМ при действии поражающих факторов, а также в задачи синтеза. Этим самым обеспечено новое качество моделирования – варьированность, управляемость и целенаправленное изменение с целью обеспечения заданных ТТХ за счет обоснованного выбора проектно-технологически-производственных решений.

3. При решении задачи о действии ударно-волновой нагрузки на элементы ББМ уч-

тен новый фактор – проектно-технологически-производственные решения. При этом как инструмент обеспечения заданного уровня компонент ГТХ предложен метод анализа влияния этих решений и характеристик ударной волны, являющийся развитием метода анализа реакции бронекорпусов на ударно-волновое нагружение.

4. Для решения задачи о бронезащищенности ББМ от действия кинетических боеприпасов разработан подход 3D-анализа полидиаграмм бронестойкости, являющийся развитием традиционных 3D диаграмм, формируемых не просто в виде отдельных поверхностей, а как объединение множества лепестков, получаемых при варьировании тех или иных параметров. Это дает возможность ставить в более адекватной постановке задачи синтеза по критерию защищенности от кинетических боеприпасов.

5. Для анализа динамического НДС бронекорпусов от действия усилий отдачи при стрельбе разработана усовершенствованная математическая модель, отличающаяся учетом влияния проектно-технологически-производственных параметров на составляющие этой модели. Это дает возможность строить не только временные распределения напряжений в корпусе, но и параметрические зависимости, которые, в свою очередь, могут стать основой при выборе проектно-технологически-производственных решений.

6. Задача отстройки от резонансных режимов путем обоснования проектно-технологически-производственных решений и параметров бронекорпусов поставлена как задача нелинейного программирования. Далее на основе применения нового подхода с использованием технологии "серого" ящика эта задача сводится к определению чувствительности на основе решения серии пробных задач при конечном варьировании параметров. Получаемый набор "реперных" решений дает основу для сведения задачи к серии задач линейного программирования. Этим достигается соединение преимуществ традиционных технологий "белого (прозрачного)" и "черного" ящиков, в то же время устраняются их недостатки ресурсозатратность и значительная погрешность соответственно. Кроме того, предложено использовать "лепестковую" структуру поверхности отклика и "плавающий" набор реперных решений, что увеличивает точность вследствие локализации аппроксимационных поверхностей в тех подобластях, куда перемещается текущее итерационное приближение искомого решения задачи синтеза, причем аппроксимация осуществляется на все более сжимающейся окрестности текущей точки параметрического пространства. В результате достигается увеличение степени "прозрачности серого" ящика не повсюду, а локализовано, что еще более повышает точность аппроксимации действительной поверхности отклика. В конечном счете получаемый метод сочетает и точность, и экономность, которые существенно превышают свойства традиционных методов.

В итоге создана новая методологическая основа для решения в дальнейшем проблемы проектно-технологически-производственного обеспечения защищенности бронекорпусов от действия комплекса поражающих факторов на этапе проектно-технологических исследований и подготовки производства новых ББМ.

**Литература:** 1. Литвиненко А.В. *Общий подход к проектно-технологическому обеспечению защищенности бронекорпусов транспортных средств специального назначения* / А.В. Литвиненко, Н.А. Ткачук, Б.Я. Литвин [и др.] // *Механіка та машинобудування*. – Харків: НТУ "ХПИ", 2012. – № 2. – С. 221-229. 2. Литвиненко А.В. *Общий подход к проектно-технологическому обеспечению тактико-технических характеристик военных колесных и гусеничных машин путем обоснования параметров бронекорпусов по критериям прочности и защищенности* / А.В. Литвиненко // *Вісник НТУ "ХПИ"*. – Харків: НТУ "ХПИ", 2014. – № 29 (1072). – С. 68-77. 3. Ткачук Н.А. *Чувствительность прочностных и*



жесткостных характеристик тонкостенных элементов машиностроительных конструкций к неравномерному изменению толщины / Н.А. Ткачук, А.В. Литвиненко, А.В. Ткачук [и др.] // Вісник СевНТУ. Серія: Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь: Сев-НТУ, 2013. – Вип. 137. – С.187-191.

**4.** Литвиненко А.В. Специализированные системы для компьютерного проектирования, исследования и изготовления элементов транспортных средств специального назначения / А.В. Литвиненко // Вісник НТУ "ХПИ". – Харків: НТУ "ХПИ", 2013. – № 23 (996). – С. 111-121. **5.** Ткачук Н.А. Основы обобщенного параметрического описания сложных механических систем / Н.А. Ткачук, А.Д. Чепурной, Г.Д. Грищенко [и др.] // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В.Даля. – 2007. – №9(115), част. 1. – С. 196-205. **6.** Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Н.А. Ткачук, Г.Д. Грищенко, А.Д. Чепурной [и др.] // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ "ХПИ", 2006. – № 1. – С. 57–79.

**7.** Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Химмельблау Д. – М.: Мир, 1975. – 534 с. **8.** Карманов В.Г. Математическое программирование / Карманов В.Г. – М.: Изд. группа "URSS", 2004. – 264 с. **9.** Реклейтис Г. Оптимизация в технике. Том 1 / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М.: Мир, 1986. – 348 с. **10.** Реклейтис Г. Оптимизация в технике. Том 2 / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М.: Мир, 1986. – 320 с. **11.** Литвиненко А.В. Методы и средства решения проблемы проектно-технологического обеспечения защищенности корпусов боевых бронированных машин / А.В. Литвиненко, Н.А. Ткачук, А.В. Грабовский [и др.] // Вісник НТУ "ХПИ". – Харків: НТУ "ХПИ", 2014. – №22 (1065). – С.106-119. **12.** Zienkiewicz O.C. The Finite Element Method. Vol. 1: Basic Formulation and Linear Problems / Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. – McGraw-Hill, London, 1989. – 725 p.

**13.** Литвиненко А.В. Численное моделирование реакции тонкостенной конструкции на действие ударно-волновой нагрузки / И.Н. Карапейчик, С.Т. Бруль, В.М. Мазин [и др.] // Вісник НТУ "ХПИ". – Харків: НТУ "ХПИ", 2011. – № 51. – С. 59-65. **14.** Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения / Н.А. Ткачук, С.Т. Бруль, А.Н. Малакей [и др.] // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ "ХПИ", 2005. – №1. – С.184-194. **15.** Моделирование физико-механических процессов в корпусах легкобронированных машин: подходы, модели, эффекты / С.Т. Бруль, Н.А. Ткачук, А.Ю. Васильев [и др.] // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ "ХПИ", 2011. – № 1. – С. 66-73. **16.** Фридман Я.Б. Механические свойства металлов / Я.Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1972. – 472 с. **17.** Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с. **18.** Чепков И.Б. Модель процесса проникания составного удлиненного поражающего элемента в экранированную преграду / И.Б. Чепков, С.А. Лавриков // Пробл. прочности. – 2003. – № 2. – С. 102-111. **19.** Математическое представление построения трехмерных тактических диаграмм с учетом движения и изменения ориентации корпуса бронированной машины в пространстве / О.Е. Шаталов, А.Ю. Ларин, А.Ю. Васильев [и др.] // Вестник НТУ "ХПИ". Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – 2005. – №53. – С.152-161. **20.** Танченко А.Ю. Влияние толщины панелей на спектр собственных частот колебаний корпусов транспортных средств специального назначения / А.Ю. Танченко // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Машинознавство та САПР. – Харків : НТУ "ХПИ", 2013. – №23 (996). – С. 138-145. **21.** Голоскоков Е.Г. Нестационарные колебания механических систем / Е.Г. Голоскоков, А.П. Филиппов. – К.: Наукова думка, 1966. – 335 с. **22.** Гринев В.Б. Оптимизация стержней по спектру собственных значений / В.Б. Гринев, А.П. Филиппов. – К.: Наук. думка, 1979. – 211 с. **23.** Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности / К. Васидзу. – М.: Мир, 1987. – 542 с. **24.** Метод прямого конечного возмущения конечно-элементных моделей при численном исследовании динамических, жесткостных и прочностных характеристик тонкостенных элементов машин строительных конструкций / А.Ю.Танченко, А.В. Литвиненко, А.Д. Чепурной [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. – Брянск: БГТУ, 2014. – № 4(44). – С.114-124. **25.** Бабаков И.М. Теория колебаний / И.М. Бабаков. – М.: Наука, 1968. – 560 с. **26.** Танченко А.Ю. Методы расчета напряженно-деформированного состояния тонкостенных конструкций при изменении толщины в процессе эксплуатации: дис... кандидата техн. наук: 05.02.09 – динамика и прочность машин / Танченко Андрей Юрьевич. – Харьков, 2013. – 209 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Litvinenko A.V. *Obschiy podhod k proektno-tehnologicheskomu obespecheniyu zaschischennosti bronekorpusov transportnykh sredstv spetsialnogo naznacheniya* / A.V. Litvinenko, N.A. Tkachuk, B.Ya. Litvin [i dr.] // *Mekhanika ta mashinobuduvannya*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2012. – # 2. – S. 221-229. 2. Litvinenko A.V. *Obschiy podhod k proektno-tehnologicheskomu obespecheniyu taktiko-tehnicheskikh karakteristik voennykh kolesnykh i gusenichnykh mashin putem obosnovaniya parametrov bronekorpusov po kriteriyam prochnosti i zaschischennosti* / A.V. Litvinenko // *Visnik NTU "KhPI"*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – # 29 (1072). – S. 68-77. 3. Tkachuk N.A. *Chuvstvitelnost prochnostnykh i zhestkostnykh karakteristik tonkostennykh elementov mashinostroitelnykh konstruktsey k neravnomernomu izmeneniyu tolschiny* / N.A. Tkachuk, A.V. Litvinenko, A.V. Tkachuk [i dr.] // *Visnik SevNTU. Seriya: Mekhanika, energetika, ekologiya*. – Sevastopol: Sev-NTU, 2013. – Vip. 137. – S.187-191. 4. Litvinenko A.V. *Spetsializirovannyye sistemy dlya kompyuternogo proektirovaniya, issledovaniya i izgotovleniya elementov transportnykh sredstv spetsialnogo naznacheniya* / A.V. Litvinenko // *Visnik NTU "KhPI"*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2013. – # 23 (996). – S. 111-121. 5. Tkachuk N.A. *Osnovy obobschennogo parametricheskogo opisaniya slozhnykh mekhanicheskikh sistem* / N.A. Tkachuk, A.D. Chepurnoy, G.D. Gritsenko [i dr.] // *Visnik Shidnoukr. nats. un-tu Im. V.Dalya*. – 2007. – #9(115), chast. 1. – C. 196-205. 6. *Konechno-elementnyie modeli elementov slozhnykh mekhanicheskikh sistem: tehnologiya avtomatizirovannoy generatsii i parametrizovannogo opisaniya* / N.A. Tkachuk, G.D. Gritsenko, A.D. Chepurnoy [i dr.] // *Mekhanika ta mashinobuduvannya*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2006. – #1. – S. 57–79. 7. Himmelblau D. *Prikladnoe nelineynoe programmirovaniye* / D. Himmelblau – M.: Mir, 1975. – 534 s. 8. Karmanov V.G. *Matematicheskoe programmirovaniye* / Karmanov V.G. – M.: Izd. gruppa "URSS", 2004. – 264 s. 9. Rekleytis G. *Optimizatsiya v tehnikе. Tom 1* / G. Rekleytis, A. Reyvindran, K. Regsdel. – M.: Mir, 1986. – 348 s. 10. Rekleytis G. *Optimizatsiya v tehnikе. Tom 2* / G. Rekleytis, A. Reyvindran, K. Regsdel. – M.: Mir, 1986. – 320 s. 11. Litvinenko A.V. *Metody i sredstva resheniya problemy proektno-tehnologicheskogo obespecheniya zaschischennosti korpusov boevykh bronirovannykh mashin* / A.V. Litvinenko, N.A. Tkachuk, A.V. Grabovskiy [i dr.] // *Visnik NTU "KhPI"*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – #22 (1065). – S.106-119. 12. Zienkiewicz O.C. *The Finite Element Method. Vol. 1: Basic Formulation and Linear Problems* / Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. – McGraw-Hill, London, 1989. – 725 p. 13. Lytvynenko A.V. *Chyssennoye modelyrovaniye reaktsiy tonkostennoy konstruktsey na deystviye udarno-volnovoy nahruzky* / Y.N. Karapeychyk, S.T. Brul', V.M. Mazyn [y dr.] // *Visnyk NTU "KhPI"*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2011. – # 51. – S. 59-65. 14. *Struktura spetsyalyzovannykh yntehyrovannykh sistem avtomatyzirovannoho analyza y synteza elementov transportnykh sredstv spetsyal'noho naznachenyya* / N.A. Tkachuk, S.T. Brul', A.N. Malakey [y dr.] // *Mekhanika ta mashinobuduvannya*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2005. – #1. – S.184-194. 15. *Modelyrovaniye fizyko-mekhanicheskyykh protsessov v korpusakh lehkobronirovannykh mashyn: podkhody, modeli, efekty* / S.T. Brul', N.A. Tkachuk, A.Yu. Vasylyev [y dr.] // *Mekhanika ta mashinobuduvannya*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2011. – # 1. – S. 66-73. 16. Frydman Ya.B. *Mekhanicheskyye svoystva metallov* / Ya.B. Frydman. – M.: Mashynostroeniye, 1972. – 472 s. 17. Pysarenko H.S. *Spravochnyk po soprotivleniyu materialov* / H.S. Pysarenko, A.P. Yakovlev, V.V. Matveev. – Kyev: Nauk. dumka, 1988. – 736 s. 18. Chepkov Y.B. *Model' protsessa pronykaniya sostavnoho udlynennoho porazhayushcheho elementa v ekranirovannuyu prehradu* / Y.B. Chepkov, S.A. Lavrykov // *Probl. prochnosti*. – 2003. – # 2. – S. 102-111. 19. *Matematicheskoe predstavleniye postroyeniya trekhmernykh taktycheskykh dyahramm s uchetom dvyzhenyya y yzmeneniya oryentatsiy korpusa bronirovannoy mashyny v prostranstve* / O.E. Shatalov, A.Yu. Laryn, A.Yu. Vasylyev [i dr.] // *Vestnyk NTU "KhPY"*. Tem. vyp.: *Mashynovedeniye y SAPR*. – 2005. – #53. – S.152-161. 20. Tanchenko A.Yu. *Vliyanie tolschiny paneley na spektr sobstvennykh chastot kolebaniy korpusov transportnykh sredstv spetsialnogo naznacheniya* / A.Yu. Tanchenko // *Visnik NTU "KhPI"*. Seriya: *Mashynoznavstvo ta SAPR*. – Harkiv : NTU "KhPI", 2013. – #23 (996). – S. 138-145. 21. Goloskokov E.G. *Nestatsionarnyye kolebaniya mekhanicheskikh sistem* / E.G. Goloskokov, A.P. Filippov. – K.: Naukova dumka, 1966. – 335 s. 22. Grinev V.B. *Optimizatsiya sterzhney po spektru sobstvennykh znacheniy* / V.B. Grinev, A.P. Filippov. – K.: Nauk. dumka, 1979. – 211 s. 23. Vasidzu K. *Variatsionnyie metody v teorii uprugosti i plastichnosti* / K. Vasidzu. – M.: Mir, 1987. – 542 s. 24. *Metod pryamogo konechnogo vozmushcheniya konechno-elementnykh modeley pri chislennom issledovanii dinamicheskikh, zhestkostnykh i prochnostnykh karakteristik tonkostennykh elementov mashin stroitelnykh konstruktsey* / A.Yu. Tanchenko, A.V. Litvinenko,

*A.D. Chepurnoy [i dr.] // Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – Bryansk: BGTU, 2014. – # 4(44). – S.114-124. 25. Babakov I.M. Teoriya kolebaniy / I.M. Babakov. – M.: Nauka, 1968. – 560 s. 26. Tanchenko A.Yu. Metodyi rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya tonkostennyih konstruksiy pri izmenenii tolschinyi v protsesse ekspluatatsii: dis... kandidata tehn. nauk: 05.02.09 – dinamika i prochnost mashin / Tanchenko Andrey Yurevich. – Harkov, 2013. – 209 s.*

Хлань О.В., Малакей А.М., Ткачук М.А., Зарубіна А.О., Грабовський А.В., Танченко А.Ю., Васильєв А.Ю., Литвиненко О.В., Посохов В.В., Кохановська О.В., Храмова І.Я., Набоков А.В.

**ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГІЧНО-ВИРОБНИЧЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТАКТИКО-ТЕХНІЧНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК БОЙОВИХ БРОНЬОВАНИХ МАШИН:  
ПІДХОДИ, МОДЕЛІ І МЕТОДИ**

У статті міститься виклад загальних підходів, методів та моделей для проектно-технологічно-виробничого забезпечення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин (ТТХ). ТТХ розглядаються як результат технічних рішень на етапах проектування, технологічної підготовки та виробництва. Реакція елементів бойових броньованих машин на дію чинників ураження моделюється системою диференціальних рівнянь, у яку інтегруються варійовані параметри. Цілеспрямована зміна цих параметрів призводить до поліпшення ТТХ бойових броньованих машин.

Хлань А.В., Малакей А.Н., Ткачук Н.А., Зарубина А.А., Грабовский А.В., Танченко А.Ю., Васильев А.Ю., Литвиненко А.В., Посохов В.В., Кохановская О.В., Набоков А.В.

**ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БОЕВЫХ БРОНИРОВАННЫХ  
МАШИН: ПОДХОДЫ, МОДЕЛИ И МЕТОДЫ**

В статье изложены общие подходы, методы и модели для проектно-технологично-производственного обеспечения тактико-технических характеристик боевых бронированных машин (ТТХ). ТТХ рассматриваются как результат технических решений на этапах проектирования, технологической подготовки и производства. Реакция элементов боевых бронированных машин на действие поражающих факторов моделируется системой дифференциальных уравнений, в которую интегрируются варьируемые параметры. Целенаправленное изменение этих параметров приводит к улучшению ТТХ боевых бронированных машин.

A. Khlan, A. Malakey, M. Tkachuk, A. Zarubina, A. Grabovskiy, A. Tanchenko, A. Vasiliev, A. Lytvynenko, V. Posohov, O. Kokhanovska, A. Nabokov

**DESIGN, TECHNOLOGICAL AND PRODUCTION SUPPORT OF PERFORMANCE  
CHARACTERISTICS OF ARMORED COMBAT VEHICLES: APPROACHES, MODELS  
AND METHODS**

The paper contains an outline of common approaches, methods and models for the design, technological and production support of performance characteristics of armored combat vehicles. Performance characteristics are considered as a result of technical solutions at the design, manufacturing and manufacturing stages. The reaction of armored combat vehicles elements to the action of damaging factors is modeled by the system of partial differential equations. Variable parameters are integrated into this system of equations. A purposeful change of these parameters leads to improved performance characteristics of armored combat vehicles.