

*А.В. МАРТЫНЕНКО*, м. н. с. каф. ТММиСАПР НТУ „ХПИ”;  
*А.Ю. ТАНЧЕНКО*, м. н. с. каф. ТММиСАПР НТУ „ХПИ”;  
*С.Т. БРУЛЬ*, к.т.н., с.н.с. ЦНИИ вооруж. и воен. техники, Киев;  
*А.Ю. ВАСИЛЬЕВ*, к.т.н., с. н. с. каф. ТММиСАПР НТУ „ХПИ”;  
*О.В. ВЕРЕТЕЛЬНИК*, м. н. с. каф. ТММиСАПР НТУ „ХПИ”

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОБЪЕКТОВ БРОНЕТАНКОВОЙ ТЕХНИКИ, ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ ВОЗДЕЙСТВИЮ ГИДРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

В работе решена задача по обеспечению обоснованного выбора конструктивных схем и параметров элементов боевых машин (БМ), подвергающихся действию гидрогазодинамических нагрузок, для обеспечения заданных тактико-технических характеристик (ТТХ). Для этого были разработаны новые подходы и математические модели, обоснованы направления анализа и синтеза параметров этих элементов, предложена и реализована структура специализированного программно-модельного комплекса (СМПК), проведены экспериментальные исследования методами голографической спекл-интерферометрии и непосредственных измерений. Был предложен подход, дающий возможность учитывать нелинейность от действия каждой компоненты нагрузки. В развитие данного подхода адаптировано, с одной стороны, расширенное параметрическое описание элементов гидрообъемных передач (ГОП) и напряженно-деформированного состояния (НДС) их элементов, а с другой – усовершенствована математическая модель НДС путем учета нелинейностей, обусловленных наличием контактного взаимодействия. Для подтверждения применимости разработанных в работе подходов подробно были исследованы две системы БМ: гидрообъемная передача ГОП-900, влияющая на такую ТТХ как подвижность, и артиллерийский ствол типа КБАЗ, влияющий на огневую мощь. Была решена задача о динамическом НДС ствола пушки, что дает основание для необходимости учета динамических процессов в стволе при осуществлении выстрелов. Созданный в работе СМПК дает возможность формирования и наполнения специализированной базы данных для обоснования конструктивных и технологических решений, обеспечивающих прочность и жесткость как блока цилиндров ГОП, так и танкового орудия, что, в свою очередь, дает возможность обеспечить ТТХ проектируемых перспективных машин.

**Ключевые слова:** элементы боевых бронированных машин, гидрообъемная передача, ствол, подвижность, точность, тактико-технические характеристики, напряженно-деформированное состояние, собственные частоты, метод конечных элементов.

**Введение.** Мировое и отечественное бронетанкостроение испытывает разнообразие тенденции в развитии проектных решений для перспективных тяжелых боевых бронированных машин. Это касается и тактико-технических характеристик (ТТХ), повышение которых ставится в качестве одной из приоритетных задач. В этом контексте в качестве одной из наиболее развитых ТТХ отечественных танков является подвижность. Это достигается, в первую очередь, путем применения высокоэффективных двигателей с противоположным движением поршней, обладающих высокой удельной мощностью и малыми габаритами. В то же время мировые тенденции, воплощаемые в требованиях потенциальных зарубежных заказчиков бронетанковой техники, требуют совершенствования трансмиссий. В частности, одним из перспективных решений в этом направлении является применение гидротрансформаторов, а с учетом ограниченных габаритов моторно-трансмиссионного отдела

© А.В. Мартыненко, А.Ю. Танченко, С.Т. Бруль,  
А.Ю. Васильев, О.В. Веретельник, 2014

ния – предпочтительно радиальных, у которых размеры могут быть значительно меньше, чем у аналогичных аксиальных передач. Однако такое решение влечет за собой резкое возрастание действующих эксплуатационных нагрузок, поскольку мощность, передаваемая от танковых дизелей (до 1200-1500 л.с.), значительна. При этом все возможные традиционные расчетных методик, опирающихся на линейаризованные расчетные модели напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов гидропередач, исчерпаны, а их дальнейшее использование в условиях наличия множественных контактных сопряжений в конструкции гидропередачи может привести к грубым ошибкам в проектных решениях.

Таким образом, сформировалось противоречие между стремлением обеспечить рост тактико-технических характеристик боевых машин (БМ) за счет применения гидрообъемных передач (ГОП) и ограниченными возможностями современных расчетных средств. Аналогичная ситуация – и для других элементов БМ, подвергающихся действию гидрогазодинамических (ГГД) нагрузок (цилиндры двигателей, стволы пушек, элементы амортизаторов, трубопроводов и т.п.). В результате возникает актуальная научная задача – разработка подходов и математических моделей для анализа НДС и синтеза параметров этих элементов, обеспечивающих заданные ТТХ проектируемых БМ. Данная задача определила направления исследований, описанных в работе.

*Целью работы* является разработка теоретических основ обеспечения заданных ТТХ перспективных отечественных тяжелых боевых машин путем обоснования рациональных параметров элементов ГОП военных колесных и гусеничных машин (ВКГМ) и других элементов, подвергающихся действию гидрогазодинамической нагрузки, на основе совершенствования подходов и математических моделей НДС наиболее нагруженных и ответственных их деталей, средств компьютерного анализа и синтеза по критериям прочности, жесткости и минимизации габаритов и массы.

**Постановка задач исследований.** Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Разработка нового подхода к параметрическому моделированию конструкции и заданию значимых факторов, определяющих работоспособность и технические характеристики радиальной ГОП, а также совершенствование комплексной математической модели для анализа НДС ее наиболее нагруженных и ответственных деталей с учетом контактного взаимодействия и действия многокомпонентной нагрузки, в т.ч. компьютерная реализация разработок для проведения многовариантных расчетов и обоснования параметров элементов гидропередач по критериям прочности, жесткости, снижения массы и габаритов и обеспечения работоспособности на номинальных и экстремальных режимах работы. Обобщение разработанной модели и подходов к исследованию других элементов БМ, подвергающихся действию ГГД нагрузок.

2. Проведение комплексных многовариантных исследований силового нагружения и НДС системы взаимодействующих тел «блок цилиндров – шаровые поршни – статорное кольцо с беговой дорожкой», определение влияния различных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, а также их комбинаций на прочность и жесткость элементов ГОП и формирование на этой основе рекомендаций по обоснованию рациональных параметров гидропередачи, обеспечивающих ее высокие технические параметры, прочность, жесткость и работоспособность в составе танковой трансмиссии. Проведение исследований динамическо-

го НДС ствалов танковых пушек.

3. Проведение экспериментальных исследований НДС элементов ГОП с целью обоснования точности и достоверности результатов численного моделирования, проведенного и описанного в работе, а также проверки работоспособности созданной гидропередачи.

**Анализ методов исследования гидропередачи.** В качестве первого этапа исследований рассмотрены современные тенденции проектирования гидравлических машин в трансмиссиях транспортных средств специального назначения, численные и экспериментальные методы исследования НДС элементов боевых машин.

Основная тенденция развития научных исследований элементов боевых машин – повсеместное применение сложных программных исследовательских комплексов, основанных на численных методах анализа, одним из которых является метод конечных элементов (МКЭ). Эти комплексы позволяют производить решение связанных задач для исследования полной картины НДС, возникающей при учете комбинации всех значимых факторов. Это позволяет эффективно решать отдельные задачи обеспечения ГТХ боевых бронированных машин путем обеспечения прочности наиболее нагруженных и ответственных деталей при действии гидрогазодинамических нагрузок.

В результате анализа состояния вопроса исследования НДС элементов боевых машин в литературе [1-5] выявлено, что несмотря на большое количество методов (численных и экспериментальных) и моделей (математических и численных), в настоящее время отсутствуют комплексные средства для численного и экспериментального определения реакции элементов проектируемых машин на действие многокомпонентных нагрузок, совокупное действие которых нелинейно сказывается на результирующем НДС. В связи с этим возникает актуальная и важная научно-техническая задача разработки методов и моделей для исследования НДС элементов БМ под действием гидрогазодинамических нагрузок.

**Методы исследований.** В работе предложены теоретические методы анализа напряженно-деформированного состояния элементов радиальной ГОП для тяжелых БМ. Рассмотрены основные трудности, возникающие при решении задач анализа прочности и жесткости элементов гидромашин. Как показал анализ конструкции, технологии изготовления и условий эксплуатации современных гидромашин, одной из наиболее характерных их особенностей является многокомпонентность, интенсивность и разнообразие нагрузок (в работе сокращенно обозначено МИР, рис. 1, а), которым подвергаются элементы этих машин. При проектировании таких конструкций конкурируют две тенденции: сокращение массы и уменьшение габаритных размеров; повышение рабочего давления, частоты вращения и передаваемой мощности.

Возникает также (с технологической точки зрения) проблема обоснования качества обработки трущихся поверхностей, назначения технологических зазоров при сборке деталей с натягом и термообработке взаимодействующих частей. При этом еще одним фактором, изменяющим саму природу задачи анализа НДС, является наличие контактного взаимодействия во множестве многокомпонентных нагрузок гидромашин. Оно присутствует и при осуществлении вращательных, поступательных движений сопрягаемых деталей этих машин (роторы, цилиндры, поршни), и при качении высоконагруженных тел по направляющим (катящиеся поршни, статорные направляющие), и при взаимодействии отдельных деталей, собранных с натягом.

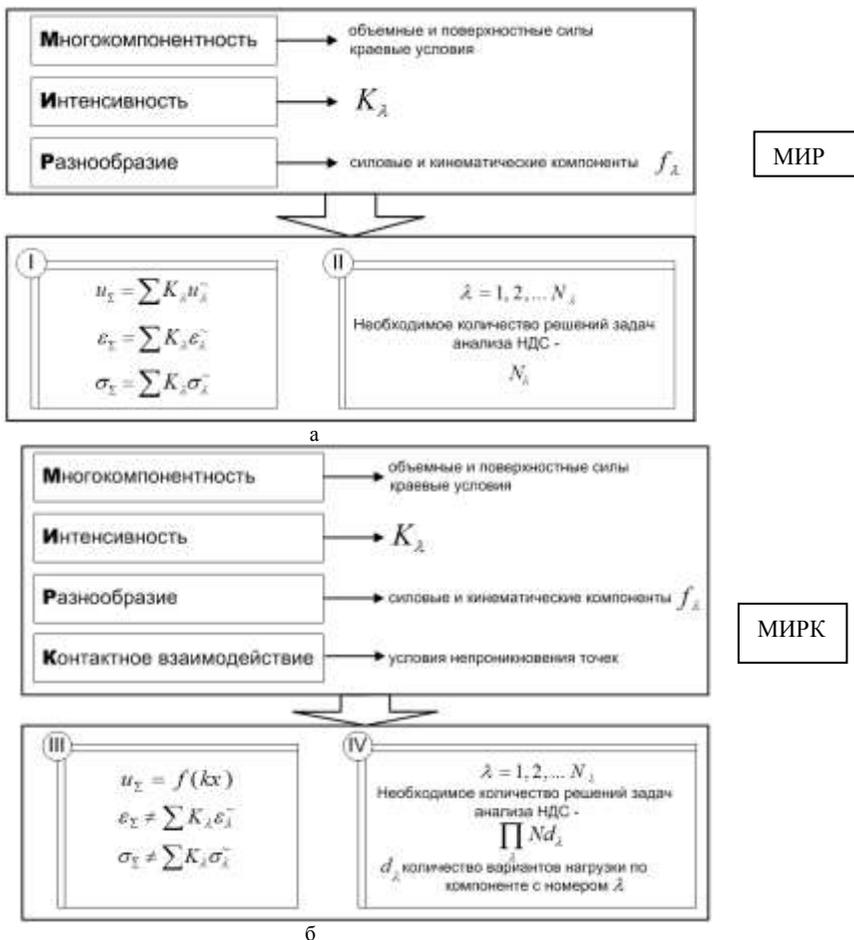


Рисунок 1 – Отличие задач анализа НДС в линейном (а) и нелинейном (б) случае

Такое количество факторов превращает задачу анализа НДС в существенно нелинейную, так как в многокомпонентном пространстве факторов нагружения нельзя выделить набор базовых единичных нагрузок  $f(\lambda^{\sim})$ , при приложении которых определяются характерные поля перемещений  $u_\lambda^{\sim}$ , деформаций  $\varepsilon_\lambda^{\sim}$  и напряжений  $\sigma_\lambda^{\sim}$ , а затем результирующие НДС ( $u_\Sigma$ ,  $\varepsilon_\Sigma$ ,  $\sigma_\Sigma$ ) при действии произвольных нагрузок  $f_\lambda = K\lambda f(\lambda^{\sim})$  получить как линейную комбинацию полей соответствующих параметров НДС  $u_\lambda = \sum K_\lambda u_\lambda^{\sim}$ ,  $\varepsilon_\lambda = \sum K_\lambda \varepsilon_\lambda^{\sim}$ ,  $\sigma_\lambda = \sum K_\lambda \sigma_\lambda^{\sim}$ . Поэтому для анализа влияния различных комбинаций факторов и получения точного решения данную задачу необходимо решать большое число раз. На диаграмме (см.

рис. 1) показано качественное отличие традиционной и рассматриваемой постановок задачи. При этом принципиальными при осуществлении перехода «МИР-МИРК» являются 2 момента: трансформация линейных зависимостей (I) в нелинейные (III); существенный рост количества решаемых задач анализа (от случая II – к случаю IV).

Исходя из вышеизложенного, в общем случае необходимо одновременно решить две задачи:

1) разработка методов решения задач анализа НДС элементов гидромашин с учетом контактного взаимодействия при заданном наборе исходных данных в виде параметров  $P$ ,  $P_N$  и нагрузок  $f$  ;

2) интеграция создаваемых расчетных моделей в цикл проектно-исследовательских работ с обеспечением автоматического варьирования параметрами  $P$ ,  $P_N$  и нагрузками  $f$  с возможностью оптимизации.

Учитывая повсеместное применение CAD/CAM/CAE систем в проектных исследованиях [6-9], требуется также автоматизация проводимых этапов решения задач анализа НДС.

Для решения первой задачи наиболее естественным образом подходит метод конечных элементов – самый мощный из современных численных методов анализа НДС тел сложной формы, в том числе с учетом контактного взаимодействия. Для решения второй задачи привлекается метод обобщенного параметрического моделирования, предложенный в работах [8, 9].

На основе привлечения и адаптации этого метода был разработан специализированный программно-модельный комплекс (СПМК), который дает возможность автоматизировать все проектно-исследовательские работы, значительно уменьшить их трудоемкость и сократить ресурсы, требуемые для обеспечения проектных исследований. Алгоритм работы и основные модули СПМК представлены на рис. 2. Он создан на основе построения множества параметрических моделей элементов гидротрансмиссий, а также средств варьирования этими параметрами, анализа и постпроцессинга. Эти возможности отличают данный инструмент исследований от предыдущих разработок.

Таким образом, предложен и обоснован метод решения контактных задач, возникающих при исследовании взаимодействия различных элементов гидротрансмиссий, основанный на МКЭ и адаптированный для встраивания в цикл проектных исследований элементов ГОП. Данный метод, в отличие от традиционных, сочетает применение различных моделей для учета контакта.



Рисунок 2 – Общий алгоритм СПМК

В исследуемой конструкции есть как минимум две основных области кон-

тактных взаимодействия: «штулка – корпус блока цилиндров» и «шар-поршень – втулка». Поэтому в местах соприкосновения тел необходимо вводить специальное контактное сопряжение (рис. 3), которое подчиняется соответствующим физическим законам и описывается определенными разрешающими уравнениями. Ниже приводятся разрешающие уравнения для метода конечных элементов,

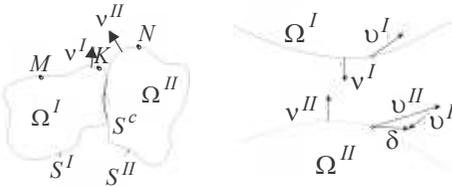


Рисунок 3 – Основные обозначения теории контактного взаимодействия

включающие в себя учет контактного взаимодействия. Они отвечают слабым формам, которые в общем случае включают в себя сумму полной виртуальной энергии и добавку в виде вклада от контактного сопряжения.

Для расширенного метода Лагранжа, использованного при решении, слабые условия контакта после подстановки аппроксимаций для скоростей  $v(X, t)$  и множителей Лагранжа  $\lambda(\xi, t)$  записываются в виде

$$\delta G_{AL} = \int_{S^c} \delta \left( \lambda^T \Lambda^T \phi v + \frac{\alpha}{2} v^T \phi^T \phi v \right) dS.$$

Их вариация имеет вид  $\delta G_{AL} = \delta \lambda^T G v + \delta v^T G^T \lambda + \delta v^T P_c(\alpha) v$ , где

$$P_c = \int_{S^c} \beta_1 \phi^T \phi H(\delta) dS,$$

и итоговое выражение для слабой формы –

$$Q^{int} - Q^{ext} + M a + G^T \lambda + P_c(\alpha) v = 0, \quad G v \leq 0,$$

где  $Q^{int}$  и  $Q^{ext}$  – работа внутренних и внешних сил,  $M$  – матрица масс. В итоге, разрешающее уравнение метода конечных элементов с учетом контактного взаимодействия будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} K + P_c & G^T \\ G & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} d \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q^{ext} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Рассмотрен частный случай гидромашин – гидрообъемная передача ГОП-900, спроектированная ГП «ХКБМ им. А.А. Морозова» [10] как пример для проверки предложенного метода решения. Проанализированы основные параметры нагружения и предложен способ математического определения комплекса нагрузок, действующих на исследуемую конструкцию (рис. 4). Кроме того, разработан новый подход к параметрическому анализу и синтезу параметров элементов ГОП-900 как сложных механических систем под действием многокомпонентных нагрузок, для которых неприменим принцип суперпозиции (см. рис. 1).

Предложенные подходы и модели распространены на широкий класс элементов БМ, подвергающихся действию гидрогазодинамических нагрузок. В частности, в дополнении к блоку цилиндров ГОП-900 была разработана усовершенствованная математическая модель динамического НДС ствола танковой пушки при производстве выстрела с учетом влияния подвижной гидрогазодинамической нагрузки и инерционно-весовых усилий.

Рассмотрим, следуя работе [13], модельный объект в виде тела вращения

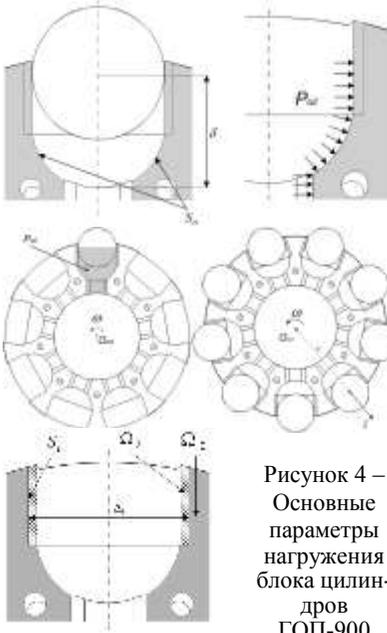


Рисунок 4 – Основные параметры нагружения блока цилиндров ГОП-900

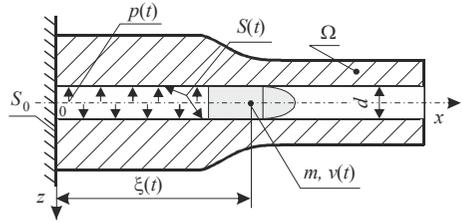


Рисунок 5 – Модель исследуемого объекта

(рис. 5). Ось канала ствола определяет связанную с ним систему координат  $Oxyz$ . Ось  $x$  – вдоль канала ствола, ось  $z$  – перпендикулярна к ней и расположена в вертикальной плоскости. Под действием образующихся от момента начала горения пороховых газов  $t = 0$  давлений  $p(t)$  снаряд массой  $m$  движется, ускоряясь в канале ствола. Его текущее положение  $\xi(t)$  и скорость  $v(t)$  определяются создаваемым давлением  $p(t)$ . Отвлекаясь от вариантов распределения  $p(t)$ , а также конструктивного исполнения

(т.е. вида области  $\Omega$ ) ствола, приходим к следующим модельным задачам.

*Задача 1 – Динамическое напряженно-деформированное состояние ствола.* Заданы  $p(t)$ ,  $\xi(t)$ ,  $v(t)$ , масса  $m$ , калибр  $d$  и  $\Omega$ . Соответственно, задается область  $S(t)$  – нагружаемая часть внутренней поверхности канала ствола. Вводя в рассмотрение цилиндрическую систему координат  $Ox\varphi x$  ( $x \equiv x$ ,  $r|_{\varphi=0} \equiv z$ ) для области  $\Omega$ , получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}; \varepsilon_\varphi = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{u_r}{r}; \varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}; \varepsilon_{rx} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\partial u_r}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial r} \right); \varepsilon_{\varphi x} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u_x}{\partial \varphi} + \frac{\partial u_\varphi}{\partial x} \right); \\ \varepsilon_{r\varphi} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{u_\varphi}{r} \right); \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{rx}}{\partial x} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} + F_r = 0; \\ \frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{\varphi x}}{\partial x} + \frac{2\sigma_{r\varphi}}{r} + F_\varphi = 0; \frac{\partial \sigma_{rx}}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \sigma_{\varphi x}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\sigma_{rx}}{r} + F_x = 0. \end{cases} \quad (2)$$

*Задача 2. Поперечные колебания ствола.* Преследуя цель построить модель первого приближения, рассмотрим модель ствола танковой пушки в виде консольно защемленного слева стержня длиной  $l$ , с изгибной жесткостью  $EI$  и погонным весом  $\mu$ . Вдоль ствола со скоростью  $v(t)$  движется тяжелый груз (снаряд) массой  $m$  (рис. 6). Текущие положения  $\xi(t)$  и  $v(t)$  определяются законом действия поро-

ховых газов, и здесь, как и ранее, считаются заданными. Задан также угол наклона пушки в вертикальной плоскости. Тогда полные перемещения точек оси канала ствола (прогиб  $W_{\Sigma}$ ) можно представить как сумму статического  $W_0$  и динамического  $W$  прогибов:

$$W_{\Sigma} = W_0(x) + W(x, t). \quad (3)$$

Здесь прогибы  $W_0(x)$  удовлетворяют уравнению и граничным условиям

$$EI \partial^4 W / \partial x^4 = \mu g, \quad g = g \cos \alpha, \quad W_0(0) = W_0'(0) = 0, \quad W_0''(l) = W_0'''(l) = 0, \quad (4)$$

а динамические  $W(x, t)$  – уравнению, краевым и начальным условиям

$$EI \partial^4 W / \partial x^4 + \mu \partial^2 W / \partial t^2 = P, \quad W(x, 0) = \dot{W}(x, 0) = 0, \quad \forall x. \quad (5)$$

Решение уравнения (4) принимает вид:

$$W_0 = \mu g x^4 / 24EI - (C_1 l^2 / 2 + 6C_5 l) x^2 / 2 - C_1 l x^3 / 6. \quad (6)$$

Искомую динамическую компоненту можно представить в виде ряда

$$W = \sum_k f_k(t) \cdot \varphi_k(x), \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

где  $\varphi_k(x)$  – собственные формы колебаний стержня определяемые как

$$EI \varphi_k^{IV} - \omega^2 \mu \varphi_k = 0, \quad \varphi_k^{IV}(x) - K^4 \mu \varphi_k(x) = 0, \quad K^4 = \mu \omega^2 / EI. \quad (8)$$

Решение (8) представляет собой линейную комбинацию функций Крылова  $K_i$  [12]

$$K_{1,3} = S, U = 1/2 [ch(kx) \pm \cos(kx)], \quad K_{2,4} = T, V = 1/2 [sh(kx) \pm \sin(kx)]. \quad (9)$$

С учетом краевых условий получаем:

$$\{C \cdot S(k, l) + D \cdot T(k, l) = 0; C \cdot V(k, l) + D \cdot S(k, l) = 0, \quad (10)$$

где  $C, D$  – константы для определения собственных функций  $\varphi_k$ .

Тогда условие

$$S^2 - T(k, l)V(k, l) = 0, \quad \text{или} \quad ch(kl)\cos(kl) + 1 = 0, \quad (11)$$

задает характеристическое уравнение для  $kl$ , решение которого [12]

$$kl = \{1, 875; 4, 694; 7, 855; 10, 996; \dots\}, \quad (12)$$

из чего  $\lambda_i = D/C = -S(k_i, l)/T(k_i, l) = -V(k_i, l)/S(k_i, l)$ , и собственные формы определяются как  $\varphi_2 = C[U(k_i, x) - \lambda V(k_i, x)]$ , где  $C$  – произвольная константа.

Записав (5) в виде:

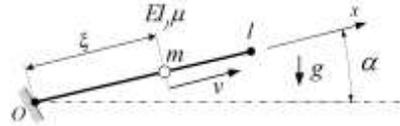


Рисунок 6 – Расчетная схема колебаний ствола

$$EI \sum_k \varphi_i^{IV} k_i^4 f_i(t) + \mu \sum_k \varphi_i \ddot{f}_i - P(g, t) = 0, \text{ где } \varphi_i' = d\varphi_i/d(k, x), \quad (13)$$

для получения решения (13) можно использовать метод Галеркина с базисными функциями  $\varphi_s(k_s, x)$ . Тогда, умножая левую и правую части (13) на  $\varphi_s$  и интегрируя в пределах  $[0; l]$ , получаем набор дифференциальных уравнений относительно функций  $f_i(t)$ :

$$R_i^{(1)} \ddot{f}_i + R_i^{(2)} \dot{f}_i + R_i^{(3)} f_i + R_i^{(4)} = 0. \quad (14)$$

Здесь коэффициенты  $R_i^{(*)}$  определяются интегрированием сомножителей при функциях  $W$  производных  $f_i : \int_0^l [*] \cdot \varphi_i(k_i, x) dx = 0$ , где  $[*]$  – левая часть выражения (13). Интегрирование (14) при начальных  $f_i(0) = \dot{f}_i(0) = 0$  дает возможность определить итоговое решение (7).

Разработанные модели можно применить для оценки колебаний и НДС блока цилиндров ГОП передач, стволів современных артиллерийских систем и других высоконагруженных элементов боевых машин.

**Результаты исследований.** Разработанные подходы, методы и модели были положены в основу при численных исследованиях элементов боевых машин, подвергающихся действию гидрогазодинамических нагрузок. Были исследованы: блок цилиндров гидрообъемной передачи ГОП-900 и условный объект-модель ствола танковой пушки (без соблюдения масштабов относительно реальных стволов). Для БЦ ГОП-900 исследованы собственные частоты и собственные формы колебаний, а также НДС. Установлено, что для данной конструкции при действующих частотах нагружения применим квазистатический подход. Определены наиболее значимые факторы, в первую очередь – величины натяга втулки-гильзы. При этом определены возможности рационального выбора как натяга втулки, так и ее формы, что дает возможность существенно повысить эксплуатационные нагрузки.

В ходе исследований были построены различные расчетные КЭМ ГОП, показанные на рис. 7.

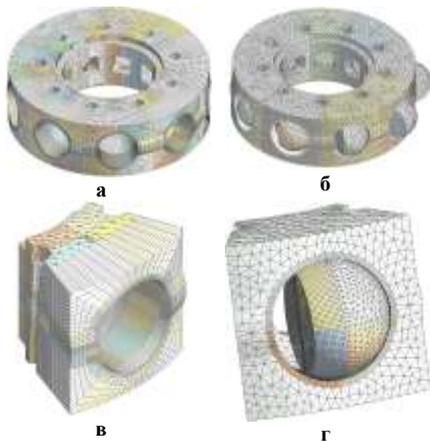


Рисунок 7 – Конечно-элементные расчетные модели блока цилиндров ГОП-900: а – модель, включающая гильзы-втулки и корпус насоса; б – аналогичная пункту а) модель, дополнительно учитывающая контактное взаимодействие втулок с шаровыми поршнями; в – модель циклического фрагмента 1/9 блока, включающая гильзу-втулку и корпус; г – аналогичная пункту в) модель, также учитывающая контактное взаимодействие с шаровым поршнем

В качестве результатов получены, в отличие от работ других исследователей, более полные множества параметрических зависимостей компонент НДС блока цилиндров при совместном варьировании давления масла и натяга. В этом существенное преимущество предложенного в работе подхода и возможностей по обеспечению заданных ТТХ по сравнению с известными решениями. Результаты расчетов, а именно величины максимальных по Мизесу напряжений, представлены ниже на рис. 8-10 для различных частей конструкции БЦ ГОП-900 в зависимости от различных величин натяга.

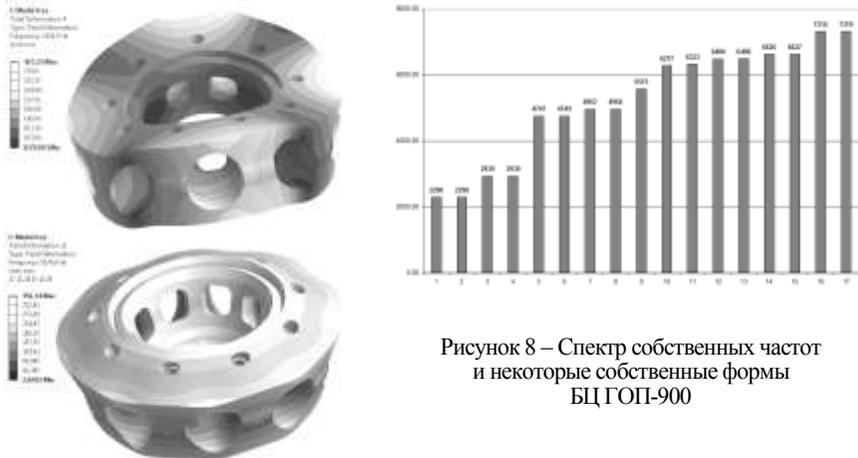


Рисунок 8 – Спектр собственных частот и некоторые собственные формы БЦ ГОП-900

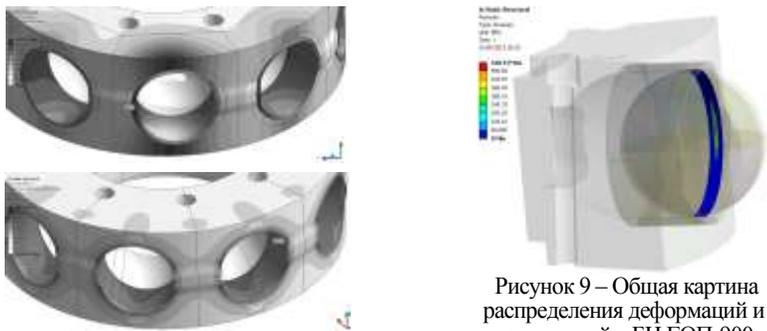


Рисунок 9 – Общая картина распределения деформаций и напряжений в БЦ ГОП-900

Как видно из результатов проведенных исследований, для улучшения прочностных характеристик блока цилиндров исследуемой гидропередачи ГОП-900 целесообразно применение гильз-втулок из сталей с высокими механическими характеристиками.

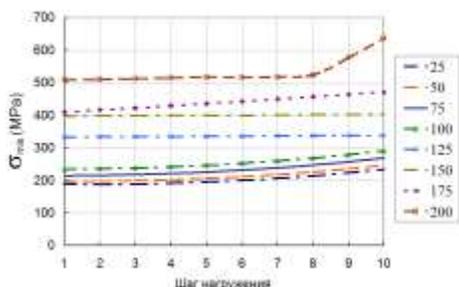
Полученные в работе данные свидетельствуют о том, что более равномерное, без резких концентраций, напряженное состояние блока цилиндров гидропередачи можно получить за счет выбора рациональной формы отдельных элементов (например, втулки). Подобную процедуру частичной оптимизации можно рекомендовать и для других элементов конструкции ГОП-900. Установлено суще-

ственное влияние упругого деформирования на изменение формы и размеров гидравлического зазора «поршень-цилиндр» гидропередачи ГОП-900. В связи с этим рационально изменить форму сопрягаемых деталей «втулка-цилиндр» для обеспечения благоприятных условий термомеханического контакта поршня с цилиндрами и повышения КПД гидропередачи.

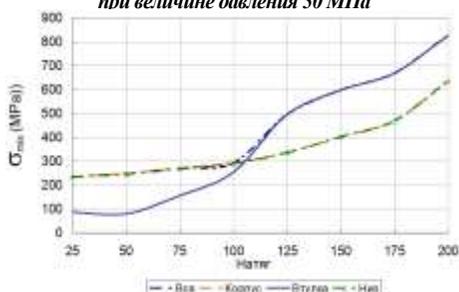
Одним из важных обнаруженных в работе факторов является не только напряженное, но и деформированное состояние блока цилиндров ГОП-900. Установлено, что за счет упругой деформации от действия натяга гильзы-втулки и нагрузок от давления рабочей жидкости форма и размеры сечения цилиндра в зоне контактных напряжений с шаровым поршнем сильно изменяются: в боковом направлении идет сильное «раздутие», а в осевом – возможно «сжатие». За счет этого изменяются величина утечек рабочей жидкости в цилиндре под нагрузкой и условия термомеханического контакта шарового поршня с цилиндром. В связи с этим представляется целесообразным модифицировать форму либо внутренней поверхности цилиндра, либо самой гильзы-втулки так, чтобы улучшить условия работы элементов гидропередачи и повысить ее КПД.

Естественно, что данные рекомендации следует рассматривать в тенденции их влияния. Более полную определенную картину возможно сложить из более тщательного анализа результатов дополнительных исследований, конструкторских и технологических соображений. В то же время они демонстрируют принципиальную возможность и эффективность предлагаемых усовершенствований.

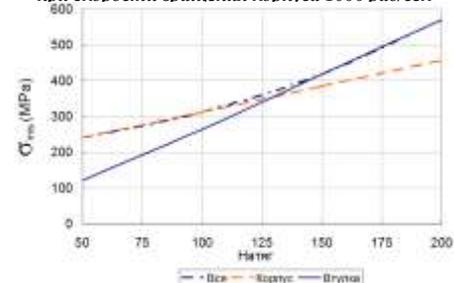
Также было проведено решение задач о динамическом НДС элементов артиллерийских стволов, что дает основание для выводов о высоких уровнях напряжений, о необходимости применения материалов с высокими механическими характеристиками, о применении технологических операций с целью создания благоприятного НДС, а также о необходимости учета динамических процессов в стволе при осуществлении выстрелов.



при величине давления 50 МПа



при скорости вращения корпуса 1000 рад/сек



при величине давления 50 МПа и изменении конструкции гильзы-втулки

Рисунок 10 – Эквивалентные напряжения по Мизесу

В частности, для первичного качественного анализа динамики и НДС разработана тестовая КЭМ с произвольно назначенными размерами (рис. 11). При этом, однако, в отличие от известных расчетных моделей, в построенной (см. рис. 11) учтены следующие новые возможности: задание подвижной нагрузки; приложение

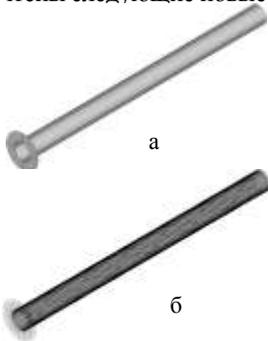


Рисунок 11 – Модель конструкции ствола пушки: а – геометрическая модель; б – конечно-элементная модель

весовой и инерционной нагрузки снаряда; учет расширяющихся усилий от обжатия снаряда; перераспределение нагрузок в нарезном стволе по сравнению с гладкоствольным; воздействие усилий трения на внутреннюю поверхность ствола от движущегося в нем снаряда. В частности, на рис.12-15 представлены некоторые результаты компьютерных расчетов.

Как видно из этих результатов, спектр собственных частот колебаний ствола достаточно плотен, причем собственные формы колебаний разнесены по характеру (продольные, изгибные, крутильные, комбинированные и т.д.). В силу этого реакцию ствола на действие подвижных газогидродинамических, весовых, инерционных и других нагрузок нельзя разделить и следует учитывать при их совместном воздействии и с учетом

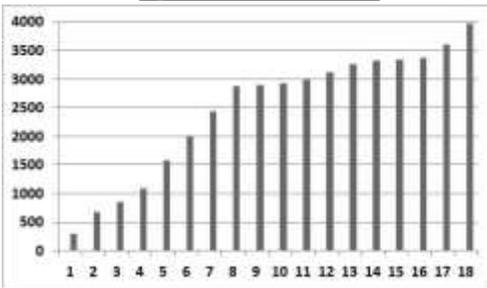


Рисунок 12 – Некоторые собственные формы и спектр собственных частот

возбуждения многих собственных форм колебаний. Таким образом, необходимо применить процедуру интегрирования развивающегося процесса во времени в полной постановке.

Полученные результаты свидетельствуют о применимости предложенных в работе подходов, моделей и программ для решения возникающих задач расчетного обеспечения тактико-технических характеристик современных боевых машин на этапе проектирования.

Предложенный в работе подход и созданный СПМК дают возможность

формирования и наполнения специализированной базы данных для обоснования конструктивных и технологических решений, обеспечивающих прочность и жесткость блока цилиндров гидropередачи, стволов артиллерийских систем и других элементов объектов бронетанковой техники, что в свою очередь дает возможность обеспечить тактико-технические характеристики проектируемых военных гусеничных и колесных машин.

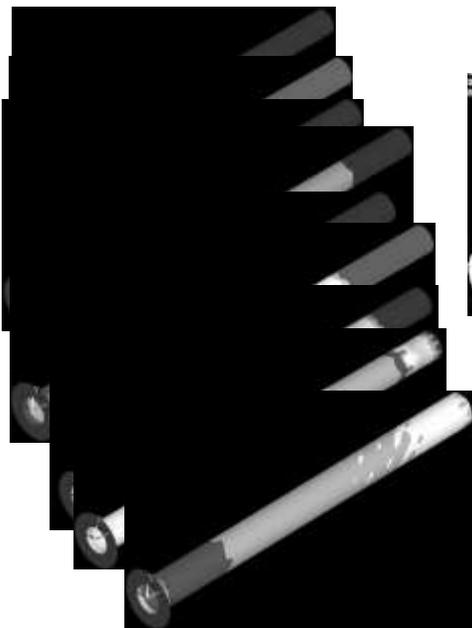


Рисунок 13 – Изменение картины НДС по мере продвижения снаряда по стволу

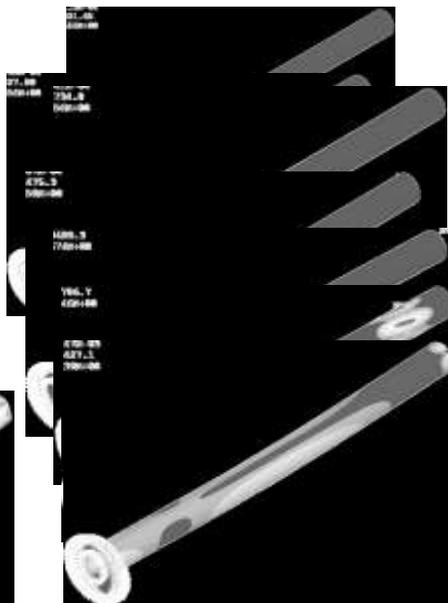


Рисунок 14 – Моделирование действия расширяющих усилий на движение снаряда по нарезам внутри ствола

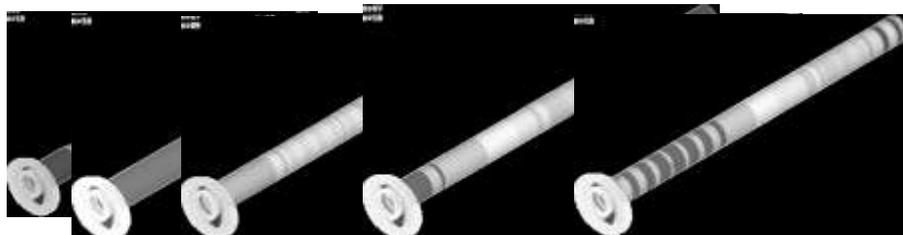


Рисунок 15 – инициация колебательного процесса под действием подвижной нагрузки

**Экспериментальные исследования.** Ниже описаны методика и результаты экспериментальных исследований НДС элементов гидрообъемных передач в соответствии с подходом, предложенным в работе [13]. При этом обоснован выбор методов голографической интерферометрии и непосредственных измерений для проведения экспериментальных исследований элементов гидропередач. Наряду с несомненными положительными качествами, метод голографической интерферометрии фиксирует общую картину напряженно-деформированного состояния с точностью до знака. Для устранения этой неоднозначности предпочтительно использование дополнительных методов исследований в нескольких характерных точках для получения численного экспериментального значения. В данной работе используется метод непосредственных измерений перемещений точек поверхности исследуемого объекта при помощи индикаторов стрелочного типа. Полученные

измерениями перемещения сравниваются с результатами метода голографической интерферометрии, а также параллельно определяется их знак.

Разработана и изготовлена экспериментальная установка, при помощи которой осуществлен комплекс экспериментальных исследований макета фрагмента ГОП-900. На рис. 16 представлены: а) схема экспериментальной установки для проведения исследований методом голографической интерферометрии в качестве одного из компонентов которой использовалась голографическая установка СИН-1 (1 – лазер; 2 – расщепитель пучка; 3 и 7 – линзовые системы; 4 и 6 – зеркала; 5 – насос для создания давления масла; 8 – фотопластинка; 9 – исследуемый объект; 10 – фиксирующее устройство; 11 – манометр стрелочного типа); б) схема экспериментальной установки для проведения исследований методом непосредственных прямых инструментальных измерений с помощью аналогового показывающего стрелочного микрометра (1 – масштабная модель корпуса гидронасоса; 2 – поршень; 3 – индикатор перемещений стрелочного типа; 4 – точки измерений на корпусе; 5 – зажимное устройство; 6 – подставка; 7 – источник сжатого воздуха; 8 – манометр стрелочного типа).

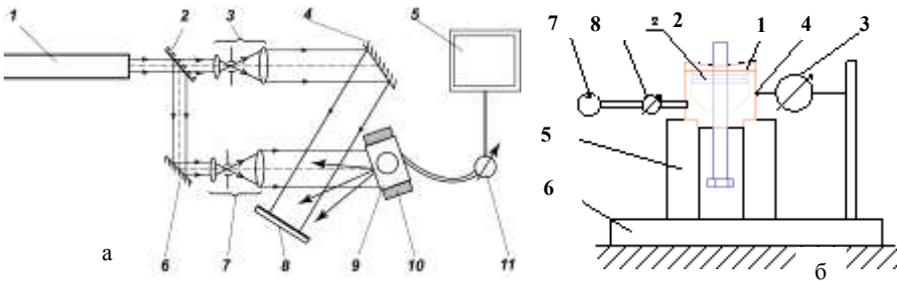


Рисунок 16 – Схемы экспериментальных установок

На рис. 17 представлены исследуемая масштабная модель фрагмента блока цилиндров и рабочие моменты экспериментальных исследований.



Рисунок 17 – Масштабная модель и рабочие моменты экспериментальных исследований



На основе основных соотношений метода спекл-голографической интерферометрии, основных методов записи и расшифровки голограмм и спекл-фотографий и метода непосредственных измерений предложена комбинированная расчетно-экспериментальная методика для макета фрагмента ГОП-900. Процесс получения, расшифровки экспериментальных данных и сравнения их с расчетной картиной распределения нормальных перемещений боковой поверхности фрагмента блока цилиндров для макета фрагмента ГОП-900 представлен на рис. 18. На

рис. 19 приведены картины распределений относительных перемещений точек модели.

В ходе расчетно-экспериментальных исследований модели фрагмента блока цилиндров ГОП-900 выявлено соответствие экспериментально и численно полученного НДС, определены параметры КЭМ для обеспечения точности численного моделирования, а также подтверждена точность и адекватность методов, моделей и результатов численного моделирования.

Таким образом, в ходе расчетно-экспериментальных исследований получено подтверждение достаточной инженерной точности используемой КЭМ; определены ее параметры, обладающие достаточной точностью численного моделирования; установлено, что погрешность вычислений составляет не более 7-10 %; в целом обоснована адекватность, достоверность и точность результатов исследований.

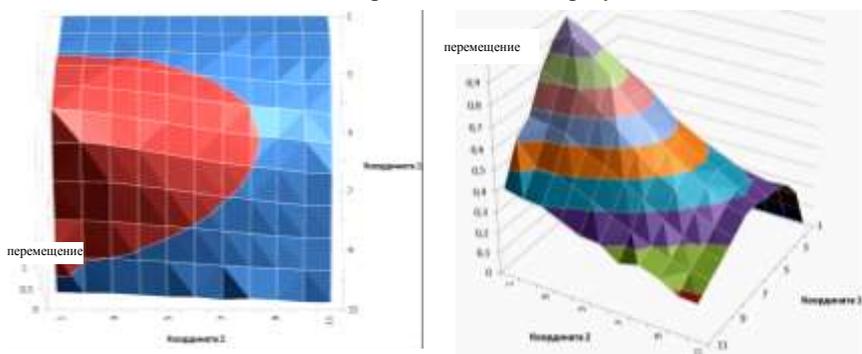


Рисунок 19 – Картина распределений относительных перемещений в модели БЦ ГОП-900

**Выводы.** В работе поставлена и решена актуальная для бронетанкостроения научно-техническая задача по обеспечению обоснованного выбора конструктивных схем и параметров радиальной ГОП по критерию прочности на этапе проектирования путем компьютерного моделирования НДС с целью обеспечения заданных ТТХ подвижности отечественных тяжелых боевых машин. Кроме того, данная методология распространена на широкий класс элементов боевых машин, подвергающихся действию гидрогазодинамических нагрузок.

Анализ результатов исследований позволяет сделать следующие выводы.

1. Анализ состояния методов расчета параметров гидропередат свидетельствует о недостаточном развитии средств математического и компьютерного моде-

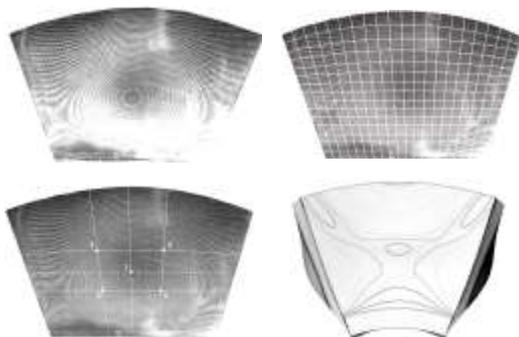


Рисунок 18 – Процесс получения, расшифровки и сравнения экспериментальных данных

лирования их НДС, особенно для высоконагруженных радиальных ГОП, предназначенных для оснащения тяжелых боевых машин. В то же время потребность отечественного бронетанкостроения в развитых средствах обеспечения заданных ТТХ подвижности этих машин при оснащении их ГОП потребовала разработки усовершенствованных подходов у математических и компьютерных моделей для анализа НДС элементов гидропередат на этапе проектирования. Аналогичные проблемы возникают и для других элементов боевых машин, подвергающихся действию гидрогазодинамических нагрузок. Это определило направления и содержание комплекса исследований, описанных в работе.

2. Анализ конструкции и условий нагружения радиальных ГОП привел к созданию расчетной модели НДС ее блока цилиндров, которая принципиально отличается от ранее созданных возможностью учета многокомпонентной нагрузки, причем в многовариантных сочетаниях величин отдельных компонент. Для исследования такого механического объекта был предложен подход, отличающийся от традиционных тем, что дает возможность учитывать нелинейность от действия каждой компоненты нагрузки, тогда как традиционные подходы реализуют линейные модели. В развитие данного подхода адаптировано, с одной стороны, расширенное параметрическое описание элементов ГОП и ее НДС, а с другой — усовершенствована математическая модель НДС путем учета нелинейностей, обусловленных наличием контактного взаимодействия. Таким образом, нелинейные математические модели при решении задач анализа и синтеза параметров ГОП являются более точными и адекватными. Эта модель была обобщена на множество элементов боевых машин, подвергающихся действию гидрогазодинамических нагрузок различного происхождения.

3. В работе предложена специализированная интегрированная компьютерная система автоматизированного исследования НДС элементов гидрообъемных передач для ВКГМ, которая, во-первых, дает возможность на 30-40% сократить сроки и стоимость их проектирования, а во-вторых — обеспечить более точное определение напряжений и деформаций, что в свою очередь издает основу для обоснования конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров и ТТХ подвижности тяжелых БМ.

4. В работе проведено обоснование конструктивных схем блока цилиндров, его геометрических, технологических и эксплуатационных параметров и свойств материала, обеспечивающих прочность и жесткость блока цилиндров при действии эксплуатационных нагрузок на тяжелые боевые машины. Определены его рациональные размеры, рекомендуемая величина натяга, механические свойства материала. Выявлено, что за счет упругих деформаций от действия эксплуатационных факторов происходит изменение номинально круглого поперечного сечения цилиндров: в зависимости от сочетания угловой скорости вращения, натяга и давление масла некруглость сечения цилиндров достигает существенной величины и увеличивает конвективную теплоотдачу. При этом, однако, было бы целесообразно изменять первоначальную геометрическую форму гильзы или цилиндра, то есть в сочетании целенаправленным образом первоначально привносимого отклонения от некруглости и отклонения в ходе работы ГОП под нагрузкой можно добиться того, чтобы в несколько раз уменьшить окружающую неравномерность распределения зазора в сопряжении «шаровой поршень – цилиндр».

5. При исследовании стволов танковой пушки в модельной постановке установлен характер динамического процесса и уровень НДС.

6. Адекватность математических, точность численных моделей НДС элементов гидрообъемных передач и достоверность сделанных рекомендаций подтверждена в ходе комплекса экспериментальных исследований модели фрагмента БЦ высокоточным методами голографической интерферометрии и путем фиксации перемещений при помощи метода прямых измерений. Погрешность расчетов не превышает 10-12%.

Описанный в работе комплекс расчетных и экспериментальных исследований дал возможность в целом обосновать выбор проектных решений, конструктивных и технологических параметров, а также эксплуатационных режимов, обеспечивающих эффективную конструкцию спроектированной в ГП «ХКБМ им. А.А. Морозова» ГОП-900. При этом обеспечиваются ТТХ подвижности перспективных отечественных боевых машин.

В дальнейшем разработанные подходы, усовершенствованные математические модели, а также соответствующее программное обеспечение могут быть применены при исследовании динамики и напряженно-деформированного состояния, обосновании конструктивных решений и параметров наиболее нагруженных и ответственных элементов конструкций боевых бронированных машин, элементов трансмиссий перспективных отечественных танков, бронетранспортеров и тягачей, стволов пушек, элементов трубопроводов, амортизаторов и т. п.

**Список литературы:** 1. Быть ли танку на поле боя? // Техника и вооружение. – 2004. – №10. – С.2-4. 2. Александров Е.Е. Динамический синтез нелинейных моделей машинных агрегатов с ДВС / Е.Е. Александров; В.М. Шатохин; Э.В. Гущенко // Вісник НТУ «ХПІ». Тем. вип. Двигатели внутреннего сгорания. – 2004. – №1. – С. 100-104. 3. Шатохин В.М. Анализ и параметрический синтез нелинейных силовых передач машин: монография / В.М. Шатохин. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 458 с. 4. Чобиток В.В. Основы теории и история развития компоновки танка / В.В. Чобиток // Техника и вооружение. – 2004. – №№4, 5, 7, 9, 10. 5. Аврулин Г.А. Оценка технического уровня объемных гидромашин / Г.А. Аврулин, В.М. Шевцов // Вісник НТУ «ХПІ». Тем. вип. Транспортне машинобудування. – 2011. – №18. – С. 59-64. 6. Саруханов Ю. «Короли» и «капусты» – 2012. Финансовые показатели ключевых разработчиков САПР/PLM за 2012г. / Ю. Саруханов // CAD/CAM/CAE Observer. – #4 (80). – 2013. – С. 24-39. 7. Глінін Г.П. Методи автоматизованого аналізу міцності та жорсткості просторових конструкцій / Г.П. Глінін, Ю.Б. Гусев, В.І. Головченко, Є.А. Орлов // Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – 2006. – № 3. – С.58-69. 8. Ткачук Н.А. Решение задач расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем / Н.А. Ткачук, Г.Д. Грищенко, Э.В. Гущенко и др. // Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ», 2004. – № 2. – С. 85–96. 9. Ткачук Н.А. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Н.А. Ткачук, Г.Д. Грищенко, А.Д. Четурной и др. // Механіка та машинобудування. – 2006. – №1. – С. 57–79. 10. <http://www.morozov.com.ua/rus/index.php>. 11. Мартыненко А.В. К вопросу о численном моделировании и экспериментальных исследованиях элементов гидрообъемных передач / А.В. Мартыненко // Вісник НТУ «ХПІ». Тем. вип.: Машиноведение и САПР. – 2009. – №12. – С.112-118. 12. Бабаков И.М. Теория колебаний. – М.: Наука, 1968. – 560 с. 13. Ткачук Н.А. Анализ динамических процессов и напряженно-деформированного состояния артиллерийских стволов / Н.А. Ткачук, А.В. Мартыненко, А.Ю. Васильев, А.В. Грабовский // Вісник НТУ «ХПІ». Тем. вип.: Машиноведение и САПР. – 2013. – №23. – С. 146-152.

*Надійшло до редакції 16. 04.2014*

УДК 621.225:539.3.

Компьютерное моделирование динамики и напряженно-деформированного состояния элементов объектов бронетанковой техники, подвергающихся воздействию гидрогазодинамических нагрузок / А.В. Мартыненко, А.Ю. Танченко, С.Т.Бруль, А.Ю. Васильев, О.В. Веретельник // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 29 (1072). – С. 83-100. – Бібліогр.: 13 назв. ISSN 2079-0075.

У роботі вирішена задача по забезпеченню обґрунтованого вибору конструктивних схем і параметрів елементів бойових машин (БМ), що піддаються дії гидрогазодинамічних навантажень, для забезпечення заданих тактико-технічних характеристик (ТТХ). Для цього були розроблені нові підходи та математичні моделі, обґрун-

товано напрями аналізу і синтезу параметрів цих елементів, запропонована і реалізована структура спеціалізованого програмно-модельного комплексу (СМПК), проведено експериментальні дослідження методами голографічної спекл-інтерферометрії і безпосередніх вимірювань. Був запропонований підхід, що дає можливість враховувати нелінійності від дії кожної компоненти навантаження. У розвиток даного підходу адаптовано, з одного боку, розширений параметричний опис елементів гідрооб'ємних передач (ГОП) та їх напружено-деформованого стану (НДС), а з іншого – удосконалено математичну модель НДС шляхом врахування нелінійностей, обумовлених наявністю контактної взаємодії. Для підтвердження застосовності розроблених в роботі підходів детально були досліджені дві системи БМ: гідрооб'ємна передача ГОП-900, що впливає на таку ТТХ як рухливість, і артилерійський ствол типу КБА3, що впливає на вогневу міць. Була вирішена задача пошуку динамічного НДС ствола гармати КБА3, що дає підставу для необхідності урахування динамічних процесів в стволі при здійсненні пострілів. Створений у роботі СМПК дає можливість формування і наповнення спеціалізованої бази даних для обґрунтування конструктивних і технологічних рішень, що забезпечують міцність і жорсткість як блоку циліндрів ГОП-900, так і танкового ствола, що, в свою чергу, дає можливість забезпечити ТТХ проєктованих перспективних машин.

**Ключові слова:** елементи бойових броньованих машин, гідрооб'ємна передача, ствол, рухливість, точність, тактико-технічні характеристики, напружено-деформований стан, власні частоти, метод скінчених елементів

Problem of ensuring informed choice of design schemes and elements of combat vehicles (CV) parameters, which are subjected to the fluid dynamics loads action, for specified tactical and technical characteristics (TTC) was solved in this paper. New approaches and mathematical models were developed, the directions of CV elements parameters analysis and synthesis were justified, structure of a specialized software and model complex (SSMC) was proposed and implemented, experimental studies were conducted with the holographic speckle-interferometry and direct measurements methods. Proposed approach gives the opportunity to take into account non-linearity of the each component of the load action. As the development of this approach advanced parametric description for the hydrovolumetric transmissions (GVT) and its stress strain state (SSS), and improved mathematical model which takes into account the non-linearities due to the presence of the contact interactions were adapted. For the developed approach applicability verification have two systems of the CV were investigated in detail: hydrovolumetric transmission GOP-900, affecting the performance characteristics such as mobility, and artillery barrel KBA3 type affecting firepower. Problem of KBA3 gun barrel dynamic stress strain state investigation. As a result the necessity of taking into account the dynamic processes during gun shot was concluded. Created SSMC allows forming and filling of the specialized database for design and technological solutions justification to ensure strength and stiffness for different CV elements. It gives the opportunity to provide promising tactical and technical characteristics of the designed machines.

**Keywords:** armored vehicles elements, hydrovolumetric transmission, gun barrel, mobility, accuracy, tactical and technical characteristics, stress-strain state, natural frequencies, finite elements method

УДК 621.833.6

**В.А. МАТУСЕВИЧ**, гл. конструктор-директор ГП “ХАКБ”, Харьков;

**Ю.В. ШАРАБАН**, зам. гл. конструктора ГП “ХАКБ”, Харьков;

**А.В. ШЕХОВ**, с.н.с. каф. теор. мех, машиноведения и роботомехан.

систем, НАКУ “ХАИ”, Харьков;

**В.Т. АБРАМОВ**, к. т. н., доц. каф. теор. мех, машиноведения и роботомехан.

систем, НАКУ “ХАИ”, Харьков

## **ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛА САТЕЛЛИТОВ ПО СТУПЕНЯМ ПЛАНЕТАРНОГО МЕХАНИЗМА ТИПА $3 \times \overline{AI}$ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА МАССЫ**

Исследована зависимость значения суммарной массы трехступенчатого планетарного механизма типа  $3 \times \overline{AI}$  с заданным общим передаточным отношением от распределения числа спутников по его ступеням. Общее передаточное отношение механизма и его распределение по ступеням выбрано по критерию минимума суммарной массы механизма. Предложены рекомендации по распределению числа спутников

---

© В.А. Матусевич, Ю.В. Шарабан, А.В. Шехов, В.Т. Абрамов, 2014