

практически любой сложности: от простой статической задачи до моделирования нелинейных быстропротекающих динамических процессов. Правильно спланированная и проведенная серия расчетов позволяет почти полностью отказаться от дорогостоящего физического моделирования. Совсем отказаться от экспериментов не позволяет важный вопрос обеспечения достоверности численной модели.

Предлагается следующая концептуальная схема. Строится математическая модель, и на ее основе проводится численное моделирование НДС. Затем отдельно строится физическая модель, и проводится эксперимент. Результаты численного и физического моделирования сравниваются. На основе этого сравнения в математическую модель вносятся коррективы. После коррекции математической модели можно провести следующую итерацию. Процесс можно повторять необходимое количество раз, пока модель с необходимой точностью можно считать достоверной.

Возвращаясь к теме статьи, необходимо провести исследование напряженно-деформированного состояния эндопротеза. Для проведения численного моделирования использовался метод конечных элементов. Экспериментальные исследования проводятся методом голографической интерферометрии.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

3.1. Основные соотношения голографической интерферометрии. Голографическая интерферометрия [6-12] является мощным инструментом проведения экспериментальных исследований. Она позволяет измерить перемещения точек поверхности исследуемого объекта. Отличительной особенностью является возможность получения результатов измерений бесконтактным способом. Это достигается за счет того, что поверхность тела освещается электромагнитным излучением. Поскольку нас не интересует физическая природа волны, то при ее описании мы ограничимся только вектором напряженности электрического поля \mathbf{E} . Второй причиной, по которой мы опускаем остальные характеристики электромагнитного поля, являются особенности используемых для регистрации фотоматериалов, которые реагируют только на электрическое поле.

В основном для измерений методом голографической интерферометрии в качестве источника света используется лазер. Лазеры излучают практически монохроматические световые волны с плоскими волновыми фронтами. Излучение обычного He-Ne-лазера непрерывного действия, используемого в голографической интерферометрии, имеет длину волны $\lambda = 632,8$ нм. Оно испускается в виде узкого пучка диаметром около 2 мм с угловой расходимостью, не превышающей 0,7 мрад [6]. Наиболее важной характеристикой лазерного излучения с точки зрения применения в методе голографической спекл-интерферометрии является его высокая когерентность.

Явление интерференции занимает центральное место в методе спекл-голографической интерферометрии [6]. На регистрирующей среде фиксиру-

ется картина освещенности, которая представляет собой усредненный во времени световой поток. Освещенность I^0 определяется по формуле [6]:

$$I^0 = \varepsilon v \overline{\mathbf{E}^2}, \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды, в которой распространяется свет, а v – скорость его распространения.

Освещенность I^0 пропорциональна усредненному во времени квадрату электрического вектора \mathbf{E}^2 . Рассмотрим явление интерференции. Пусть имеются две различные световые волны \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 одинаковой частоты, которые налагаются друг на друга. Поскольку $\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$, освещенность определяется выражением

$$I^1 = \overline{\mathbf{E}^2} = \overline{\mathbf{E}_1^2} + \overline{\mathbf{E}_2^2} + 2\overline{\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2}, \quad (2)$$

где $I^1 = I^0 / \omega$ – величина, пропорциональная I^0 ;

$\overline{\quad}$ – величина, усредненная по времени.

Пусть \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 – две линейно-поляризованные в одном направлении волны:

$$E_1 = A_1 \cos(\omega t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}), \quad E_2 = A_2 \cos(\omega t - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} + \phi), \quad (3)$$

где ϕ – постоянный относительный фазовый сдвиг между двумя волнами. При комбинировании выражения (3) и усреднении во времени

$$\overline{I^1} = \overline{I_1^1} + \overline{I_2^1} + 2\sqrt{\overline{I_1^1} \cdot \overline{I_2^1}} \cos \delta, \quad (4)$$

где $\overline{I_1^1} = A_1^2$, $\overline{I_2^1} = A_2^2$, $\delta = (\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r})$ – разность фаз между двумя волнами в произвольной точке. Освещенность меняется от минимального значения

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos \delta$$

в точках, где $\delta = (2N + 1)\pi$, до максимального

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos \delta,$$

где $\delta = 2N\pi$ (здесь N – целое положительное число). Распределение освещенности в произвольной плоскости можно зарегистрировать, поместив в эту плоскость фотопластинку. Мы имеем картину, состоящую из чередующихся светлых и темных полос. Эта интерференционная картина позволяет опреде-

лить пространственное распределение разности фаз между рассматриваемыми волнами.

Голография представляет собой метод записи и восстановления световых волн. Волна, которую записывают, называется предметной волной. Однако фотопленка или любой другой детектор регистрирует только освещенность. Освещенность, создаваемая предметной волной, есть $I_0 = \mathbf{U}_0 \cdot \mathbf{U}_0^*$ (\mathbf{U}_0 – комплексная амплитуда предметной волны в какой-нибудь одной плоскости в пространстве), т. е. действительная величина. Следовательно, на пленке, на которую падает эта волна, будет зарегистрировано распределение действительных амплитуд, а информация о распределении фаз оказывается потерянной. В явлении интерференции распределение фаз преобразуется в распределение освещенности в интерференционной картине, которое может быть зарегистрировано на фотослое.

Обычно в голографической интерферометрии используют внеосевые голограммы, записываемые по методу Лейта и Упатниекса. Их схема позволяет пространственно разделить три волны, возникающие при дифракции в процессе восстановления. Она основана на общеизвестном в теории связи способе кодирования и декодирования сигналов с помощью их модуляции высокочастотной несущей волной. В голографии, правда, имеют дело с пространственными частотами, однако принцип остается тем же. Опорная волна, добавляемая к опорной когерентная с ней и используемая для записи внеосевой голограммы, распространяется под некоторым углом к предметной волне. Для восстановления предметной волны голограмму освещают плоской волной, распространяющейся в том же самом направлении, что и исходная опорная волна.

На рис. 1, а представлена типичная оптическая система для записи внеосевых голограмм [6]. Используя метод внеосевой голографии, можно получать трехмерные изображения диффузно отражающих объектов, которые кажутся покрытыми интерференционными полосами. Присутствие интерференционных полос на изображении объекта говорит о том, что объект испытал деформацию, смещение или вращение. Интерферометрия такого типа возможна благодаря тому, что голографический метод позволяет зарегистрировать волну, рассеянную объектом, а затем восстановить ее с точностью, допускающей ее интерферометрическое сравнение с волной, рассеянной тем же объектом, но в другое время. Возможен и иной способ - интерферометрическое сравнение восстановленной волны с другой голографически зарегистрированной и восстановленной волной, рассеянной тем же объектом.

Результат сложения двух или более таких волн – голографическая интерферограмма. Термин “интерферограмма” – эта картина интерференционных полос, зарегистрированной на фотослое, а также образованной на двумерном экране или сетчатке глаза.

Голография – линейный процесс в том смысле, что она позволяет регистрировать последовательно во времени две или более оптических волны,

которые впоследствии могут быть восстановлены одновременно. Поэтому с ее помощью можно производить суммирование, вычитание или даже усреднение во времени совокупности волн.

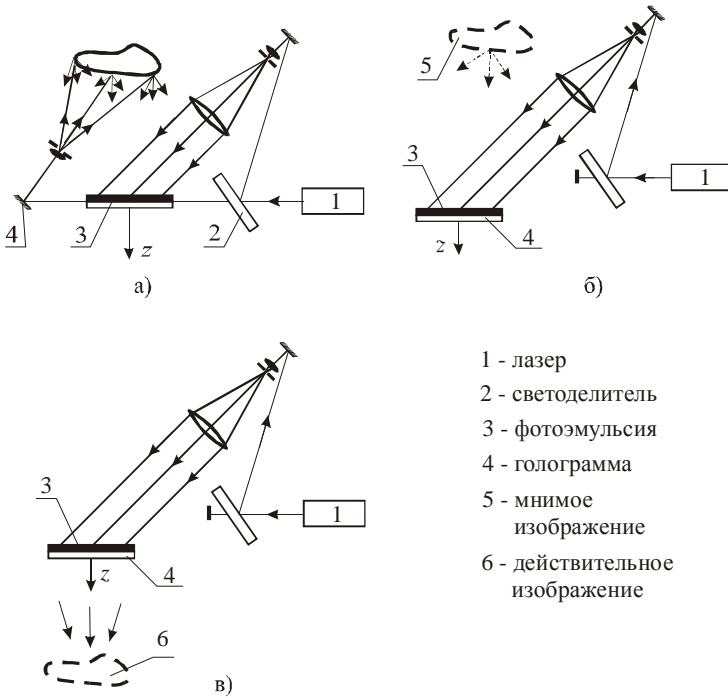


Рис. 1. Внеосевая голография:

- а – оптическая система для записи голограмм;
- б – восстановление прямого мнимого изображения;
- в – восстановление сопряженного действительного изображения

Освещенность, создаваемая восстановленной волной [6]:

$$I^1(x, y) = 2a^2(x, y) \{1 + \cos[\Delta\phi(x, y)]\}. \quad (5)$$

Выражение (5) дает освещенность объекта $a^2(x, y)$, промодулированную интерференционными полосами $2\{1 + \cos[\Delta\phi(x, y)]\}$. Темные полосы – это линии, вдоль которых значения фазы $\Delta\phi$ являются нечетными кратными числа π , светлые полосы – линии постоянных значений фазы $\Delta\phi$, являющихся четными кратными числа π .

Голографическая интерферометрия во многих случаях является эффек-

тивным и единственно возможным методом исследования. В основе этого лежат следующие ключевые свойства: высокая информативность, разделение амплитуды во времени, непрерывная запись событий, временная фильтрация.

Принимается следующая модель. Поверхность объекта состоит из набора точечных рассеивателей. Если произвольная точка поверхности P претерпевает смещение \mathbf{L} в новое положение P' , то голографическая интерференционная картина образуется в результате интерференции света, рассеянного точками P и P' , тогда как интерференции света, рассеянного точкой P , со светом, рассеянным всеми другими точками поверхности, не происходит. Эта модель удобна и достаточна для целей интерпретации полос. Роль голограммы состоит в том, чтобы воспроизвести свет, рассеянный объектом как в исходном, так и в смещенном положении. На рис. 2 приведены основные элементы схемы расшифровки, причем основной задачей является увязывание сдвига фаз δ и перемещения точек \mathbf{L} . Исходя из соотношений на рис. 2, можно записать:

$$\phi_1 = \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_1 + \mathbf{k}_2(\mathbf{R} - \mathbf{r}_1) + \phi_r; \quad (6)$$

$$\phi_2 = \mathbf{k}_3 \cdot \mathbf{r}_3 + \mathbf{k}_4(\mathbf{R} - \mathbf{r}_3) + \phi_r, \quad (7)$$

где ϕ_1 и ϕ_2 – фазы световой волны, рассеянной точкой P до и после смещения;

ϕ_r – произвольная фаза, приписываемая этим волнам в точке O , в которой расположен источник. Разность фаз, измеряемая наблюдателем, равна

$$\delta = \phi_2 - \phi_1. \quad (8)$$

Тогда

$$\delta = (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1)(\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1) + \Delta\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_3 + \Delta\mathbf{k}_2(\mathbf{R} - \mathbf{r}_3). \quad (9)$$

В реальной системе величины \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_3 гораздо больше, чем $\mathbf{L} = \mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1$, так что для практических целей можно считать, что $\Delta\mathbf{k}_1 \perp \mathbf{r}_3$ и $\Delta\mathbf{k}_2 \perp (\mathbf{R} - \mathbf{r}_3)$.

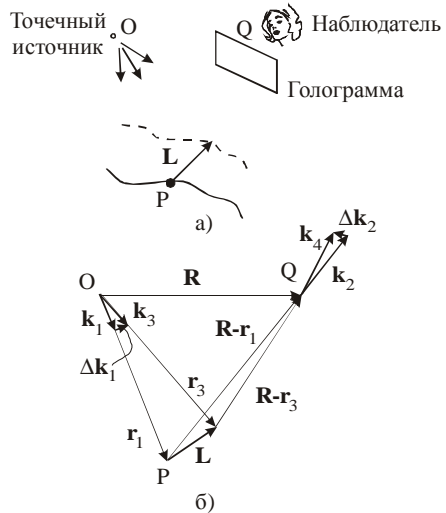


Рис. 2. Обозначения, используемые при анализе интерференционных полос: а – схема установки; б – векторы положения точек и волновые векторы

Поэтому два последних скалярных произведения в равенстве (9) пренебрежимо малы, и приходим к соотношению

$$\delta = (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{L}. \quad (10)$$

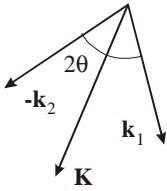


Рис.3. Вектор чувствительности

Это простое соотношение является основой количественной интерпретации полос в голографической интерферометрии. Удобно ввести вектор чувствительности $\mathbf{K} \equiv (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1)$, так что

$$\delta = \mathbf{K} \cdot \mathbf{L}.$$

Пусть 2θ – угол между направлениями освещения и наблюдения, как показано на рис. 3. Вектор чувствительности имеет величину $2k \cos \theta$ и совпадает с биссектрисой угла между направлениями освещения и наблюдения. Таким образом, одно наблюдение интерферограммы дает величину δ , которая позволяет определить компоненту \mathbf{L} в этом направлении.

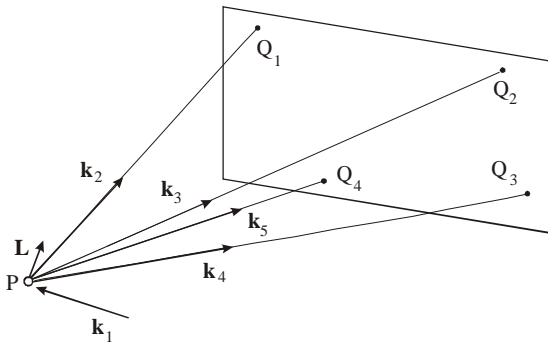


Рис.4. Одноголограммный метод (наблюдение ведется из четырех положений на одной голограмме)

Для определения компонент вектора \mathbf{L} необходимо провести серию измерений. Рассмотрим одноголографический метод измерения вектора смещения. Проанализируем схему, изображенную на рис. 4. Три независимых измерения фазы можно сделать, наблюдая точку объекта P через три различные точки голограммы Q_1, Q_2, Q_3 . Если наблюдатель непрерывно перемещает глаз из точки Q_1 в точку Q_2 , фиксируя свой взгляд (через небольшую диафрагму или телескоп) на точке P , то ему будет казаться, что полосы пересекают поле зрения. Число полос N_{1-2} , прошедших через поле зрения, является мерой разности $\delta_1 - \delta_2$, а именно:

$$\delta_1 - \delta_2 = 2\pi N_{1-2}.$$

Имея это в виду, уравнение вида (10) можно записать для каждого из четырех направлений наблюдения, показанных на рис. 4,

$$\begin{aligned}\delta_1 &= (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{L}; \\ \delta_2 &= (\mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{L}; \\ \delta_3 &= (\mathbf{k}_4 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{L}; \\ \delta_4 &= (\mathbf{k}_5 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{L}.\end{aligned}\tag{11}$$

Попарно вычитая эти уравнения можно получить

$$\begin{aligned}\delta_1 - \delta_2 &= (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3) \cdot \mathbf{L} = \overline{\mathbf{K}}_1 \cdot \mathbf{L}; \\ \delta_2 - \delta_3 &= (\mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_4) \cdot \mathbf{L} = \overline{\mathbf{K}}_2 \cdot \mathbf{L}; \\ \delta_3 - \delta_4 &= (\mathbf{k}_4 - \mathbf{k}_5) \cdot \mathbf{L} = \overline{\mathbf{K}}_3 \cdot \mathbf{L},\end{aligned}$$

или

$$\begin{bmatrix} \overline{K}_{1x} & \overline{K}_{1y} & \overline{K}_{1z} \\ \overline{K}_{2x} & \overline{K}_{2y} & \overline{K}_{2z} \\ \overline{K}_{3x} & \overline{K}_{3y} & \overline{K}_{3z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} = 2\pi \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix}.\tag{12}$$

Хотя приведенная ранее теория измерения вектора смещения достаточно ясна, при ее экспериментальном применении может возникнуть ряд проблем, влияющих на точность измерений. Наиболее очевидный источник ошибок связан с вектором чувствительности. Если общая ориентация смещений известна априори, то можно таким образом расположить голографическую систему, чтобы вектор чувствительности был почти параллелен \mathbf{L} , что позволяет производить точные измерения величины \mathbf{L} . Если направление вектора \mathbf{L} неизвестно, следует использовать более общие схемы, приводящие к уравнениям (12). Обычно телесный угол, охватываемый голограммой, невелик, и, следовательно, $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{K}_3$ почти параллельны. В результате система уравнений (12) оказывается плохо обусловленной, и малые ошибки в измерении N_{1-2} , N_{2-3} и N_{3-4} усиливаются и приводят к большим ошибкам в величинах L_x, L_y, L_z . Решение будет также чувствительным к точности геометрических измерений при определении матричных коэффициентов. Для количественного решения этих вопросов справедливы соотношения:

$$\overline{\mathbf{K}} \cdot \mathbf{L} = 2\pi N,\tag{13}$$

$$\text{где } \bar{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} \bar{K}_{1x} & \bar{K}_{1y} & \bar{K}_{1z} \\ \bar{K}_{2x} & \bar{K}_{2y} & \bar{K}_{2z} \\ \bar{K}_{3x} & \bar{K}_{3y} & \bar{K}_{3z} \end{bmatrix}; \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix}; \mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_{1-2} \\ N_{2-3} \\ N_{2-4} \end{bmatrix}.$$

Для относительной ошибки можно записать

$$\frac{\|\Delta \mathbf{L}\|}{\|\mathbf{L}\|} \leq \text{cond}(\bar{\mathbf{K}}) \frac{\|\Delta \mathbf{N}\|}{\|\mathbf{N}\|}; \quad (14)$$

$$\frac{\|\Delta \mathbf{L}\|}{\|\mathbf{L}\|} \leq \text{cond}(\mathbf{K}) \frac{\|\Delta \bar{\mathbf{K}}\|}{\|\bar{\mathbf{K}}\|}, \quad (15)$$

где $\text{cond}(\mathbf{K})$ – обусловленность матрицы \mathbf{K} ;

$\|\Delta \mathbf{N}\|$, $\|\Delta \bar{\mathbf{K}}\|$ – соответственно ошибка в определении номеров полос и ошибка определения коэффициентов матрицы \mathbf{K} , обусловленная неточностью геометрических измерений.

Для повышения точности измерений удобно использовать методику, соединяющую в одной измерительной схеме запись голограммы во встречных пучках по схеме Денисюка и фиксацию спекл-фотографии [13-20]. Для определения компонент перемещений, перпендикулярных плоскости голограммы, используется соотношение

$$u_n = (\lambda N) / 2, \quad (16)$$

где N – номер полосы;

u_n – нормальная составляющая вектора перемещения \mathbf{u} ;

λ – длина волны лазера.

Для определения перемещений u_τ в плоскости спекл-фотографии используются соотношения (рис. 5)

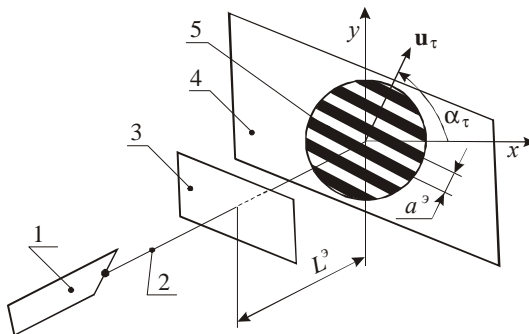


Рис. 5. Схема поточечной расшифровки спекл-интерферограмм:
 1 – лазер; 2 – неразведенный луч; 3 – спекл-интерферограмма; 4 – экран;
 5 – картина полос

$$u_{\tau} = \frac{\lambda a^3}{L^3},$$

где a^3 – расстояние между полосами на экране;

L^3 – расстояние до экрана.

При этом вектор u_{τ} направлен по перпендикуляру к полосам, наблюдаемым на экране при освещении спекл-интерферограммы неразведенным лучом лазера (см. рис.5).

Рассмотрим природу погрешностей метода голографической и спекл-интерферометрии. Природа и источники погрешностей: погрешность самой модели; погрешность измерительной схемы; погрешность носителя; погрешность расшифровки.

Влияние погрешности модели является неуправляемой величиной в ходе эксперимента. Она минимизируется при соблюдении технологии изготовления объекта или его физической модели, а также путем статистической обработки результатов множества измерений на некоторой выборке исследуемых объектов. Что касается остальных компонент погрешности, то они минимизируются путем разработки новых измерительных схем, методов расшифровки и обработки информации.

Погрешность измерительной схемы в данном случае сводится к минимуму путем использования схемы, соединяющей запись метода голографической интерферограммы и спекл-фотографии на одном носителе одновременно [13]. В этом случае удается избежать погрешностей, обусловленных традиционными технологиями расшифровки ((13)-(15)). Соотношение (16), в котором нормальная составляющая вектора перемещений отделена от тангенциальной, позволяет исключить взаимовлияние этих компонент, что максимально увеличивает точность измерений. В этом случае погрешности измерений определяются по соотношению

$$\frac{\|\Delta u_N\|}{\|u_N\|} = \frac{\|\Delta N\|}{\|N\|}. \quad (17)$$

Соответственно в данном случае относительная погрешность гораздо меньше, поскольку отсутствует влияние $cond(\mathbf{K})$.

Погрешность носителя (регистрирующей среды) уменьшается применением высококачественных фотопластин ПФГ-03, позволяющих регистрировать с высокой разрешающей способностью интерференционные полосы, что для практических приложений обеспечивает и точность фиксации, и допустимую плотность полос на голограмме. Вклад указанных выше составляющих погрешности измерений можно уменьшить практически до долей

процента.

3.2. Экспериментальная установка для записи и расшифровки интерферограмм исследуемого эндопротеза. На рис.6 изображена схема экспериментальной установки. На основании смонтировано нагружающее устройство, которое с заданной нагрузкой воздействует сжимающим усилием на объект. Состояние объекта регистрируется на фотопластине, освещаемой лазером через оптическую систему. Используется He-Ne-лазер непрерывного действия с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм. В качестве регистрирующей среды используются высококачественные фотопластины ПФГ-03.

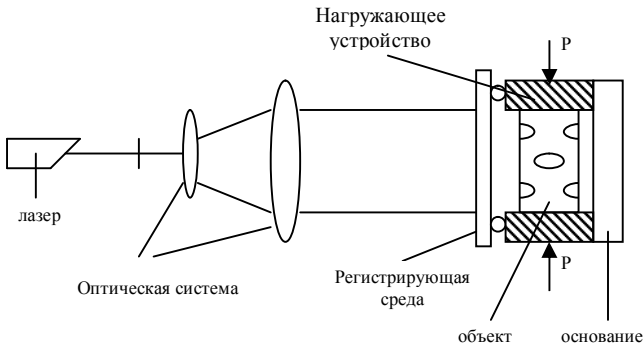


Рис. 6. Схема экспериментальной установки

3.3. Результаты экспериментальных исследований. На рис. 7–8 приведены фотографии интерферограмм исследуемого объекта. Хорошо видно нагружающее устройство. Черные полосы на интерферограммах, так называемые линии уровня, – это линии равных перемещений точек конструкции.

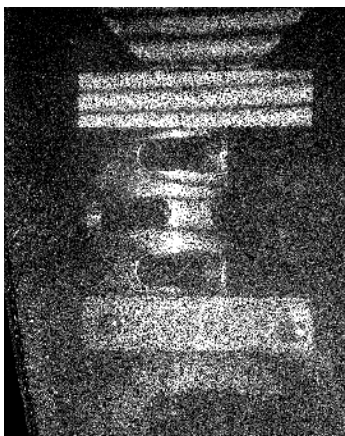
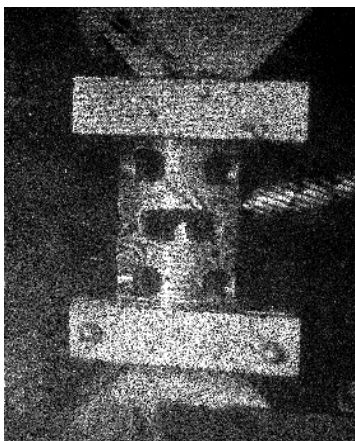


Рис.7. Фотографии интерферограмм

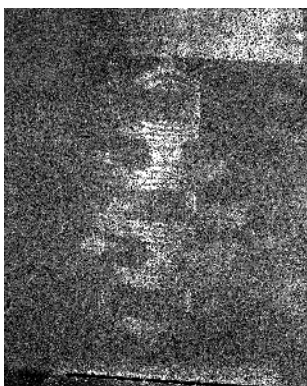
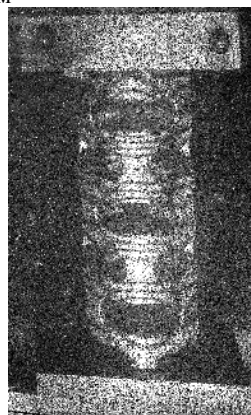
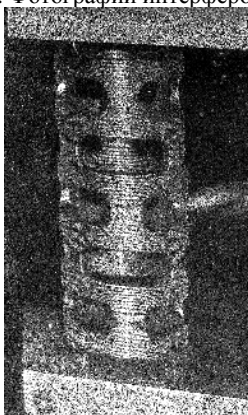


Рис.8. Фотографии интерферограмм

4. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

На рис. 9 представлено поле перемещений боковой поверхности эндопротеза при действии осевого сжимающего усилия, полученное численным моделированием НДС методом конечных элементов (МКЭ) [21-22]. На рис. 10 приведена интерференционная картина деформирования внешней поверхности эндопротеза, полученная при экспериментальном исследовании методом голографической интерферометрии. Выбираем характерные точки и сравниваем полученные результаты для численного моделирования и физического эксперимента.

Результат сравнения приведен на рис. 11. Анализ результатов показывает, что в данном случае, модель эндопротеза можно считать достоверной и использовать для дальнейших исследований, например для моделирования сегмента позвоночного столба с установленным эндопротезом. При этом параметры конечно-элементной модели (тип конечных элементов, их количество и расположение зон сгущения-разрежения являлись варьируемыми). В качестве принятых были выбраны параметры, которые обеспечивают сбалансированность численной модели по точности моделирования НДС и по объему конечно-элементной модели.

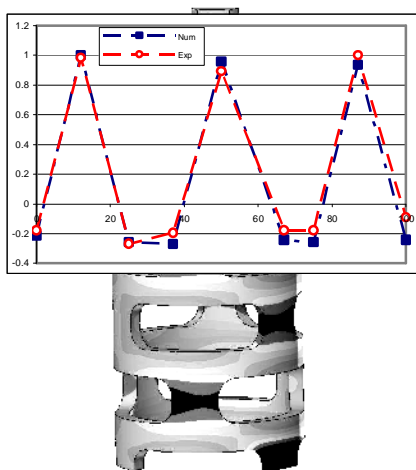


Рис. 9. Поле перемещений боковой поверхности эндопротеза при действии осевого сжимающего усилия, полученное численным моделированием при помощи МКЭ

Рис. 10. Интерференционная картина деформирования внешней поверхности эндопротеза при экспериментальном исследовании методом голографической интерферометрии

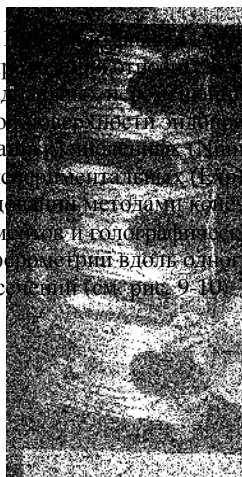


Рис. 10. Интерференционная картина деформирования внешней поверхности эндопротеза при экспериментальном исследовании методом голографической интерферометрии

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Предложен новый подход к расчетно-экспериментальному исследова-

нию элементов биомеханических систем. Он отличается тем, что экспериментальные и численные исследования проводятся параллельно, а их результатом являются достоверные конечно-элементные модели элементов биомеханических систем.

2. Предложено применить схему записи и расшифровки, которые позволяют оперативно решать задачи анализа напряженно-деформированного состояния по набору интерферограмм.

3. Получены экспериментально обоснованные конечно-элементные модели исследуемых эндопротезов, отличающиеся сбалансированностью по густоте конечно-элементной сетки и точности описания напряженно-деформированного состояния.

4. Обоснованы параметры важного элемента биомеханических систем (эндопротеза), которые можно использовать в численной модели многокомпонентной системы “сегмент позвоночника – эндопротез”.

Т.о., разработанный способ расчетно-экспериментального обоснования параметров конечно-элементных моделей эндопротезов отличается высокой достоверностью получаемых результатов и синтезируемых численных моделей. Он может встраиваться в общую цепь расчетно-экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния эндопротезов различного типа, конструктивного исполнения, а также из различных материалов.

Основные направления дальнейших исследований – использование полученных моделей для исследования поведения биомеханической системы, образующейся в результате соединения механической и биологической компонент костно-металлического блока.

Список литературы: 1. *Faciszewski T. et al.* The surgical and medical perioperative complications of anterior spinal fusion surgery in thoracic and lumbar spine in adults. A review of 1223 procedures // *Spine*. –1995. – Vol.20, №14. – p.1592-1599. 2. *Steffen T., Tzantrizos A. et al.* Cages: design and concepts // *Euro Spine*. –2000. –Vol.9(7). –p.5089-5094. 3. *Liebschner M.A.K., Kopperdahl D.L., Rosenberg W.S., Keaveny T.M.* Finite element modeling of the human thoracolumbar spine // *Spine* – 2003. –Vol.28, №6. –p.559-565. 4. *Tobias Pitzen, Fred H. Geisler, Dieter Matthis.* The influence of cancellous bone density on load sharing in human lumbar spine: a comparison between an intact and a surgically altered motion segment. *Eur. Spine J.* (2001) 10:23-29. 5. *V.K. Goel, Y.E. Kim, T.-H. Lim, J.N.Wienstein.* An analytical investigation of the mechanics of spinal instrumentation. *Spine vol. 13*, 9:1003-1011. 6. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. – М.: Мир, 1982. – 504 с. 7. *Гинзбург В.М., Степанов Б.М.* Голографические измерения. – М.: Наука, 1981. – 296 с. 8. *Роберт К. Эрф.* Голографические неразрушающие исследования – М.: Машиностроение, 1979. – 448 с. 9. *Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.* Оптическая голография – М.: Мир, 1982. –736 с. 10. Оптическая голография / Под ред. Г. Колфилда, в 2-х томах. – М.: Мир, 1982. – 736 с. 11. *Джоунс Р., Уайкс К.* Голографическая и спекл интерферометрия. – М.: Мир, 1986 – 328 с. 12. Методы неразрушающих испытаний /под ред. Р. Шарпа. – М.: Мир, 1972. – 496 с. 13. *Капустин А.А.* Теория спекл-интерферометрических измерений напряженно-деформированного состояния элементов натуральных конструкций. – В кн.: Физические основы голографии. Л.: ЛИЯФ, 1979.– С.137–159. 14. *Капустин А.А.* Теория спекл-интерферометрических измерений напряженно-деформированного состояния элементов натуральных конструкций / В кн.: Физические основы голографии. – Л.: ЛИЯФ, 1979.– С.137–159. 15. *Капустин А.А.* Методы, использующие голографическую интерферометрию для спекл-интерферометрических измерений / В кн.: Методические указания /Применение спекл-интерферометрии для контроля качества промышленных изделий. – Горький: ГФ. ВНИИМАШ, 1980.– С.45–53. 16. *Капустин А.А.* К

теории количественной оценки голографических интерферограмм / В кн.: Оптико-когерентные информационно-измерительные системы. – Харьков, 1977.– С.55–60. **17. Капустин А.А.** Количественная оценка голографических интерферограмм с помощью спекл-интерферометрии в прочностных исследованиях / В кн.: Оптико-когерентные информационно-измерительные системы. – Харьков, 1977.– С.149–154. **18. Капустин А.А.** Исследование и применение методов спекл-интерферометрии, использующих голографические изображения. – Автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: МФТИ, 1981. – 24 с. **19. Капустин А.А., Каледин В.О., Мажура С.О., Рассоха А.А.** О связи методов голографической интерферометрии со спекл-интерферометрией / В кн.: Физические основы голографии. – Л.: ЛИЯФ, 1979.– С.184–194. **20. Капустин А.А., Рассоха А.А.** Спекл-интерферометрический подход к расшифровке голографических интерферограмм / В кн.: Тезисы докл. III Всесоюзной конф. по голографии. – Ульяновск, 1978.– С.125–126. **21. Ткачук Н.А., Веретельник Ю.В.** К вопросу анализа и синтеза элементов биомеханических систем // Вісник Національного технічного університету “ХПИ”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Динаміка і міцність машин. – Харків: НТУ “ХПИ”, 2004.– № 31. – с.149-152. **22. Веретельник Ю.В.** Модели элементов биомеханических систем: решение прямых и обратных задач. Механіка та машинобудування // Науково-технічний журнал.– Харків: НТУ “ХПИ”, 2004.– № 2. – с.63-67.

Поступила в редколлегию 12.11.2005

УДК 629.1.032.531.3

С.Н. ВОРОНЦОВ, канд. техн. наук, НТУ “ХПИ”

О.П. ДОБРАНИЦА, канд. техн. наук, **С.П. ПАВЛОВ**, канд. техн. наук,
ВІВВ МВД України

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРАВЛИЧЕСКОГО БУФЕРА СО СТУПЕНЧАТОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Представлено результати експериментального дослідження характеристик гідравлічного буфера із ступінчастою характеристикою. Показано, що математична модель із достатнім ступенем точності описує його роботу.

Results of an experimental research of performances hydraulic buffer with step performance are submitted. It is shown, that the mathematical model with a sufficient degree of an exactitude describes his operation.

Одним из путей обеспечения нелинейности подвески, оказывающей благоприятное влияние на плавность хода транспортного средства, является применение демпфирующего гидравлического буфера (ГБ), вступающего в работу в конце динамического хода опорного катка [1].

Усилие на штоке ГБ с учётом сжатия жидкости определяется исходя из давления в полости прямого хода:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{1}{V_{\text{см}} \frac{a}{\left(b + a \frac{1}{p_1}\right) p_1^2} + V_{\text{см}} \psi(p_1)} \left[\frac{dV_{\text{см}}}{dt} - Q_{\text{д}\Sigma} \right],$$

где p_1 – давление жидкости в полости прямого хода;

$V_{\text{см}}$ – объем гидровоздушной смеси, который зависит от положения штока и в момент времени t определяется из соотношения

$$V_{\text{см},t} = F_1(x_{\text{max}} - x) + V_{\text{п}},$$

где x_{max} – максимальное перемещение штока;

x – положение штока в момент времени t ;

$V_{\text{п}}$ – объем пространства в полости прямого хода, заполненного рабочей смесью при крайнем положении штока;

F_1 – площадь штока;

a, b – коэффициенты, определяющие плотность гидровоздушной смеси в зависимости от температуры и давления жидкости;

$\psi(p_1)$ – коэффициент податливости гидровоздушной смеси;

$Q_{\text{д}\Sigma}$ – суммарное значение расхода жидкости через дросселирующие отверстия, которое определяется в зависимости от хода штока.

Давление жидкости в полости обратного хода p_2 определяется начальным давлением жидкости p_o и давлением, создаваемым усилием возвратной пружины.

В качестве опытного образца для проверки достоверности математической модели был использован ГБ производства ОАО “ХТЗ”. Его общий вид, конструкция и основные характеристики приведены соответственно на рис. 1 и в табл. 1.

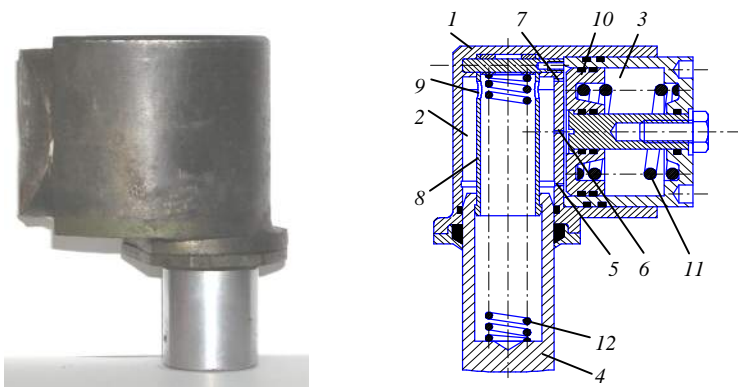


Рис. 1. Внешний вид и конструкция опытного гидробуфера:
 1 – корпус; 2 – полость прямого хода; 3 – полость обратного хода; 4 – шток;
 5, 6 – дросселирующие отверстия, перекрываемые штоком; 7 – неперекрываемое
 отверстие; 8 – направляющая штока; 9 – прямоугольные прорези и отверстия
 для обеспечения перетекания жидкости из внутренней части штока;
 10 – поршень; 11, 12 – пружины, предназначенные для возврата поршня и
 штока в исходное состояние

Таблица 1

Основные характеристики ГБ производства ОАО “ХТЗ”

Наименование	Значение
Максимальный ход штока, м	0,0515
Диаметры дросселирующих отверстий, м	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Расстояние от начального (полностью выдвинутого) положения штока до центров дросселирующих отверстий, м	Отверстие поз.5 – $5 \cdot 10^{-3}$ Отверстие поз.6 – $25 \cdot 10^{-3}$ Отверстие поз.7 – $55 \cdot 10^{-3}$
Тип жидкости	Смесь 50% трансформаторного и 50% турбинного масла
Жесткость пружины (поз.11)	$20,27 \cdot 10^3 \text{ Н м}^{-1}$
Предварительное сжатие	456 Н
Жесткость пружины (поз.12)	$7,7 \cdot 10^3 \text{ Н м}^{-1}$
Предварительное сжатие	204 Н
Масса в заправленном состоянии	7,2 кг

Для проведения эксперимента был использован стенд для испытаний амортизаторов. Учитывая, что принцип работы ГБ аналогичен работе телескопического гидравлического амортизатора, при проведении эксперимента были использованы стандартные методики испытаний гидравлических амортизаторов транспортных машин [2].

Для испытания ГБ, учитывая малый ход его штока, в стенд были внесе-

ны изменения. Экспериментальная установка и ее кинематическая схема показаны соответственно на рис.2 а и б.

На стенд был установлен кривошип с возможностью изменения радиуса в диапазоне 0,001..0,130 м. Изменение частоты циклов нагружения ГБ производилось путем изменения частоты вращения кривошипа за счет включения соответствующей передачи трансмиссии стенда.

В процессе испытаний измерялись следующие параметры: усилие на штоке ГБ; ход штока при заданной величине угловой скорости вращения кривошипа.

Для определения усилия на штоке ГБ использовалась тензоопора, применяемая при испытаниях амортизаторов. Величина перемещения штока измерялась датчиком хода, представляющего собой потенциометр, сопротивление которого зависит от величины перемещения подвижного звена. Регистрация результатов измерений осуществлялась осциллографом.

На рис. 3 представлена осциллограмма изменения параметров ГБ при включенной 5-й передаче стенда. Для расшифровки полученных осциллограмм и построения рабочей диаграммы ГБ была использована программа Graph Digitizer 2.0.

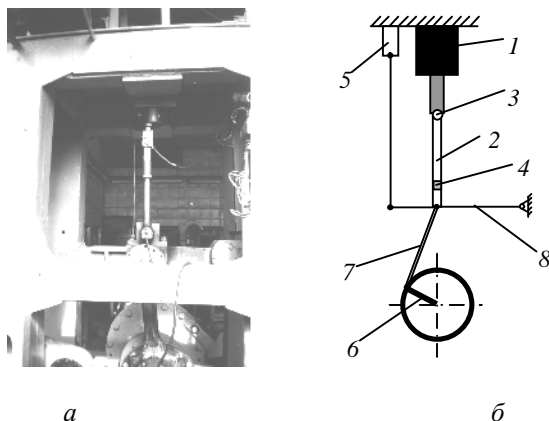


Рис.2. Экспериментальная установка (а) и кинематическая схема стенда (б) для исследования ГБ со ступенчатой характеристикой:
1 – ГБ; 2 – штанга для соединения штока с приводным механизмом; 3 – шарнир;
4 – тензоопора; 5 – датчик хода; 6 – кривошип; 7 – шатун; 8 – коромысло

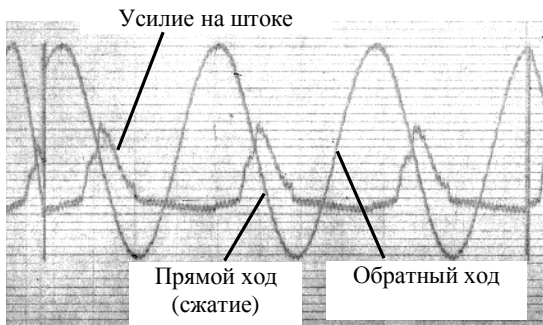


Рис.3. Осциллограмма изменения параметров ГБ при его испытании на стенде

Основные результаты эксперимента приведены в табл.2. На рис. 4 представлены теоретические и экспериментально полученные характеристики работы ГБ.

Анализ экспериментального исследования ГБ позволяет сделать следующие выводы:

- полученные характеристики для разных скоростей трансмиссии стенда представляют собой практически эквидистантные кривые;

- величина свободного хода штока ГБ составляет около 0,005 м (10% полного хода штока). Это значение зависит от давления в полости прямого хода, которое в свою очередь зависит от скорости штока и обусловлено сжатием рабочей жидкости. Игнорирование сжатия при проектировании ГБ может привести к тому, что первое из перекрываемых отверстий не будет работать, так как его перекрытие происходит практически в начале хода штока;

- перекрытие второго дросселирующего отверстия при ходе штока 25 мм приводит к росту усилия на штоке ГБ на 30%;

- обратный ход ГБ характеризуется положительными значениями усилия на штоке. Это связано с работой возвратных пружин, которые возвращают шток в исходное положение и создают усилие сжатия на тензодатчиках.

Таблица 2

Результаты анализа осциллограмм нагружения ГБ со ступенчатой характеристикой

№ передачи трансмиссии стенда	Цикличность нагружения, Гц	Максимальная скорость штока, м·с ⁻¹	Максимальное усилие на штоке ГБ, кН
ЗХ	0,31	0,045	1,996
1	0,55	0,08	2,918
2	1,02	0,147	5,237
3	1,28	0,186	6,969
4	1,61	0,233	8,841

5	2,22	0,321	13,20
6	3,06	0,442	19,29

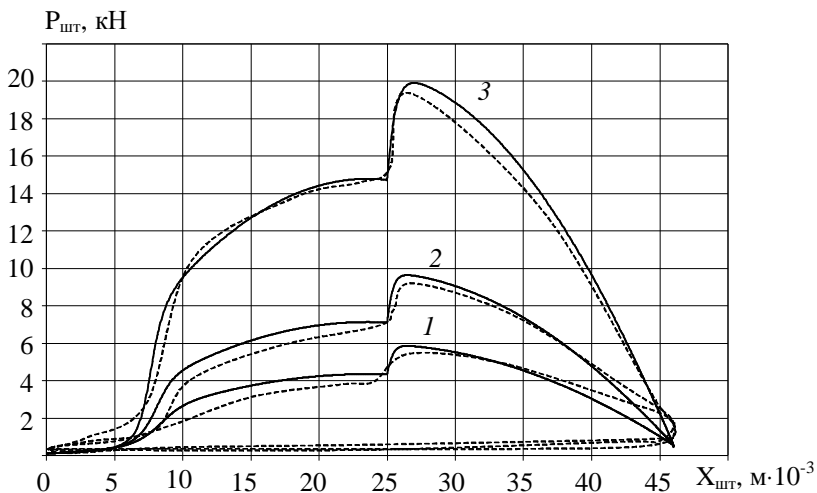


Рис.4. Сравнение экспериментальных и расчетных характеристик ГБ:
 1 – 2-я передача трансмиссии стенда; 2 – 4-я передача; 3 – 6-я передача
 (сплошная – расчетная кривая; пунктир – экспериментальная кривая)

Обращает на себя внимание более пологий характер экспериментальных кривых в месте перекрытия дросселирующих отверстий. Это связано с принятыми в математической модели допущениями, а именно, с тем, что переходные процессы в этом положении штока не учитываются. Тем не менее, с ростом скорости штока время переходного процесса уменьшается, и расчетная характеристика приближается к экспериментальной.

В результате эксперимента можно сделать вывод, что математическая модель с достаточной степенью точности описывает работу ГБ со ступенчатой характеристикой, при этом погрешность составила не более 8,4%.

Список литературы: 1. *Обзоров В.С., Стамбровский А.С., Шадов Б.Н.* Развитие систем поддресоривания танков // *Зарубежное военное обозрение.* –1984. –№5. –С.54-62. 2. *Отраслевой стандарт ОСТ 37.001.084-84.* Амортизаторы гидравлические телескопические автомобильные. Методы стендовых испытаний. – М.: Министерство автомобильной промышленности, 1984. –8 с.

Поступила в редколлегию 23.11.05

К ВОПРОСУ О ПРОВЕДЕНИИ МНОГОВАРИАНТНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОВЕДЕНИЯ ПОДВЕСКИ ЛБМ ПРИ СТРЕЛЬБЕ

Розв'язана задача розробки методики багатоваріантного аналізу динамічного стану підвіски БТР-80 при проведенні модернізації шляхом встановлення більш потужних модулів озброєння. Вибрані раціональні параметри варіювання для вирішення вказаної задачі. Використаний багатопараметричний підхід до моделювання досліджуваної конструкції.

The methods of multiple state dynamic analysis of the BTR-80 suspension during conducting of modernization by establishment of more powerful armament modules are developed. Efficient parameters for varying for the decision of the indicated task are chosen. The multiple parameter approach for modelling a researched design is used.

Введение. Легкобронированные машины (ЛБМ) сейчас есть практически в каждой воинской части Украины, на территории стран СНГ и за их пределами. Поддержание возможностей ЛБМ на современном техническом уровне требует как минимум их модернизации.

Одним из направлений усовершенствования является повышение огневой мощи, путем установки более современного боевого модуля [1]. ЛБМ представляют собой хорошую базу для установки разнообразного вооружения: миномётов, зенитно-ракетных комплексов, огнемётных установок и т.п. [2]. Однако, установка нового боевого модуля влечёт за собой необходимость исследования динамического поведения подвески, что и представляет актуальность данной задачи в современных условиях.

Постановка задачи. Предлагается использовать обобщенный параметрический подход к моделированию исследуемого объекта и проведения многовариантных расчётов [3, 4], предусматривающий задание всех используемых величин в качестве параметров (геометрия модели, характеристики подвески, характеристики боевого модуля – отдача, вес, длительность выстрела, темп стрельбы и т.д.).

Преимущества предлагаемого подхода состоят в универсальности и глобальности описания модели, что позволяет реализовать различные модификации образца варьированием параметров. Таким образом, предлагается создать модель определенного класса машин с универсальным боевым модулем и на ее основе промоделировать возможные последствия модернизации.

Методика решения. Уравнения движения системы тел (уравнения Эйлера-Лагранжа)

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}} + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{q}} \right)^T \mathbf{l} = \mathbf{F} \quad (1)$$

и уравнения связей, записанные в форме алгебраических соотношений вида

$$\Phi(q, t) = 0, \quad (2)$$

представляют собой традиционный подход при анализе механических систем. В уравнениях (1) – (2) применяются следующие обозначения: T – суммарная кинетическая энергия; Φ – вектор связей; F – вектор обобщенных приложенных сил; I – вектор множителей Лагранжа (силы реакции в связях); t – независимая переменная времени; q – вектор обобщенных координат

Систему уравнений (1)-(2) можно представить в программных кодах. Численное интегрирование уравнений, выведенных из формулировки Лагранжа (1), позволит описать движение самых различных механических систем [5]. Дифференциальные уравнения в системе (1) можно свести к уравнениям 1-го порядка путем стандартной подстановки новых зависимых переменных вместо каждой производной высшего порядка.

Используемые методики решения задач динамики основаны на прямом решении системы дифференциальных уравнений. Анализ последних работ [6, 7] показал, что основная трудность заключается в корректном составлении этой системы и сложности ее дальнейшего решения. Причем любое изменение физической модели, элементов подвески, параметров корпуса и др. повлечет за собой перестройку всей системы.

Методика проведения многовариантных расчётов:

- Построение твердотельной параметрической модели в одном из CAD (computer-aided design) пакетов (Pro/ENGINEER, Solid Works).
- Передача модели из CAD в CAE пакет и преобразование геометрической модели в физическую.
- Расчет в одном из CAE (computer-aided engineering) пакетов, (Visual-Nastran Desktop 4D, Cosmos Motion, ADAMS), где задаются необходимые кинематические, упругие, демпфирующие связи, силовые факторы и пр.

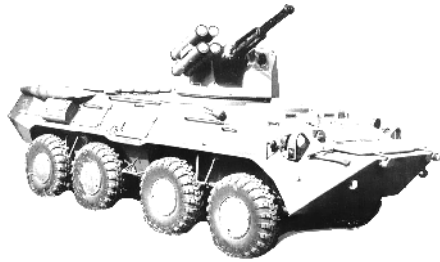


Рис. 1. БТР-80 с ракетно-пушечным модулем “Кливер”

Предлагаемая методика демонстрируется на примере машины специального назначения БТР-80 (рис. 1). Твердотельная геометрическая модель исследуемого объекта строится с достаточной степенью достоверности с точки зрения ее массово–инерционных характеристик (рис. 2).

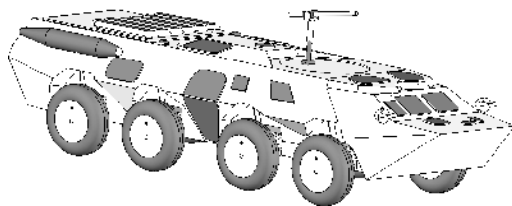


Рис. 2. Твердотельная модель

Модель узла подвески построена схематически с точностью, адекватной данному виду расчета. Далее геометрическая модель преобразуется в физическую: всем элементам сборочной модели присваиваются массово-инерционные характеристики, добавляются кинематические и упруго-демпфирующие связи (упругие свойства торсионного вала моделировались торсионными пружинами, упруго-демпфирующие свойства амортизаторов – соответственно линейными пружинами и демпферами (рис 3, 4)).

В качестве боевого модуля предлагается использовать универсальную параметрическую модель со схемой, изображенной на рис. 5. На рис. 6 приведена физическая модель всех узлов подвески.

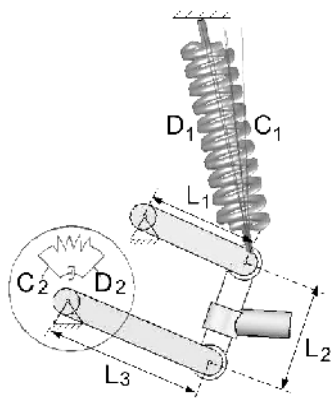


Рис. 3. Схема узла подвески

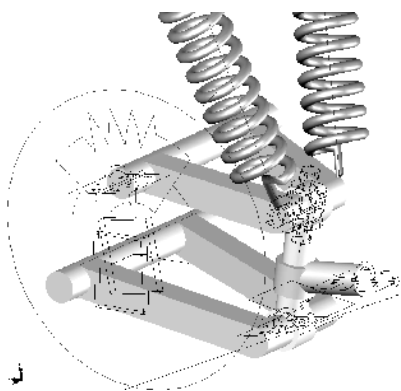


Рис. 4. Модель узла подвески

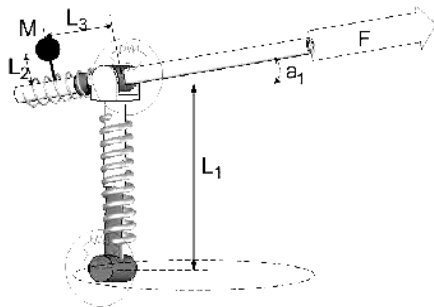


Рис. 5. Схема боевого модуля

Выстрел моделируется сосредоточенной импульсной нагрузкой, прикладываемой в некоторый момент времени, либо серией импульсов для моделирования стрельбы очередью (рис. 7). Величина прикладываемой силы, направление стрельбы и количество выстрелов также являются величинами параметрическими.

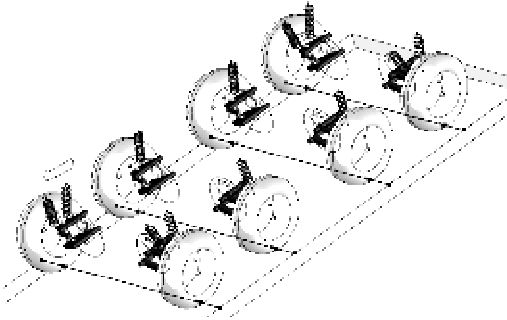


Рис. 6. Моделирование взаимодействия колес с землей

В статье использованы пробные значения усилий, действующих на боевой модуль при стрельбе, а также вероятные характеристики скорострельности пушек [8].

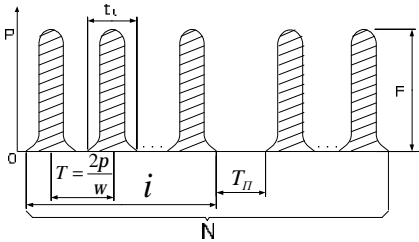


Рис. 7. График усилий отдачи при стрельбе

Результаты численных экспериментов. В качестве результатов тестового расчёта покажем несколько графиков (см. рис. 8-11) полученных характеристик корпуса и подвески при некоторых параметрах подвески.

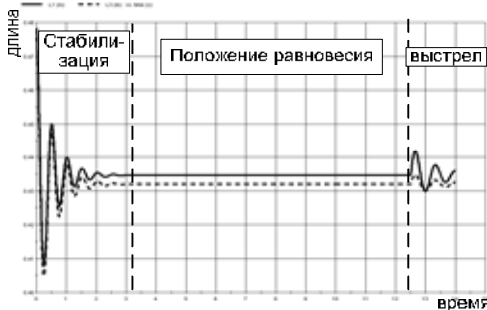


Рис. 8. График удлинения амортизаторов (пунктир – на 1-м мосте; сплошная линия – на 2-м мосте)

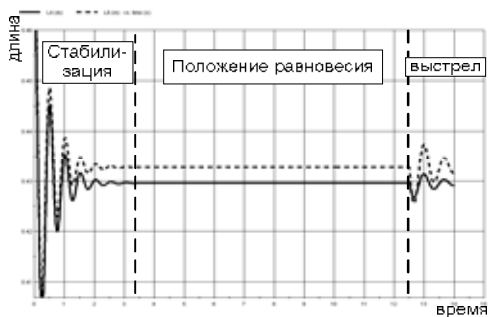


Рис. 9. График удлинения амортизаторов (пунктир - на 3-м мосте; сплошная линия - на 4-м мосте)

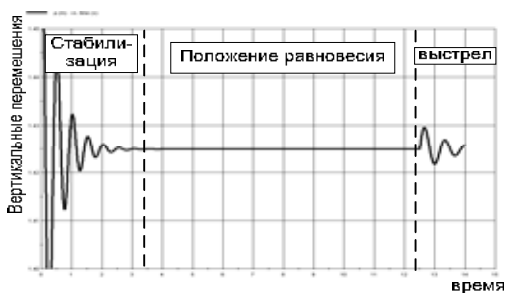


Рис. 10. График перемещений контрольной точки башни

Качественный вид изменения длины амортизатора 4-го моста при стрельбе с различным ее темпом приведен на рис. 12 – 15. Расчёт начинается с момента достижения положения равновесия машины.



Рис. 11. График ускорений контрольной точки башни

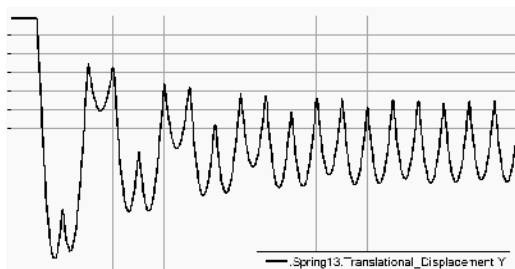


Рис. 12. Качественный вид изменения длины амортизатора 4-го моста при стрельбе со скоростью 240 выстр/мин

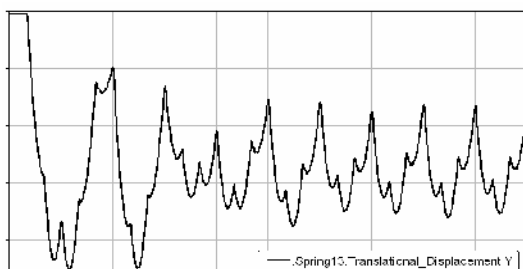


Рис. 13. Качественный вид изменения длины амортизатора 4-го моста при стрельбе со скоростью 360 выстр/мин

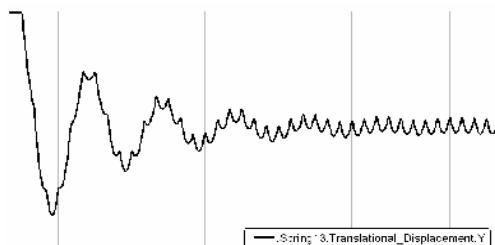


Рис. 14. Качественный вид изменения длины амортизатора 4-го моста при стрельбе со скоростью 480 выстр/мин

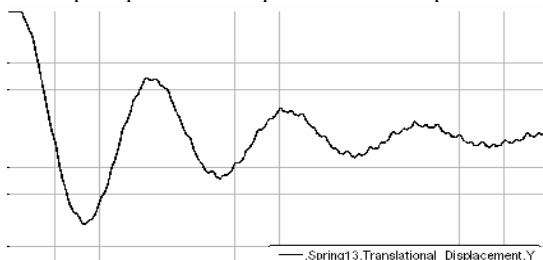


Рис. 15. Качественный вид изменения длины амортизатора 4-го моста при стрельбе со скоростью 960 выстр/мин

После проведения серии расчётов с одиночным выстрелом были построены графики качественных зависимостей перемещений, ускорений, удлинений амортизаторов и угла закрутки торсионов при изменении жесткостно-демпфирующих параметров торсионного вала (см. рис. 16 – 17).

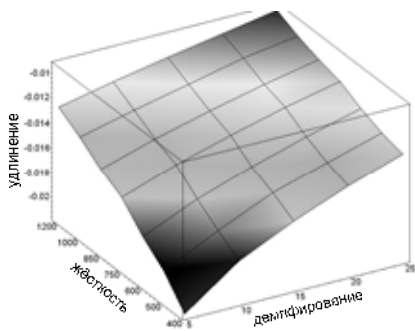


Рис. 16. Качественный вид поверхности удлинений амортизаторов на 1-м мосте

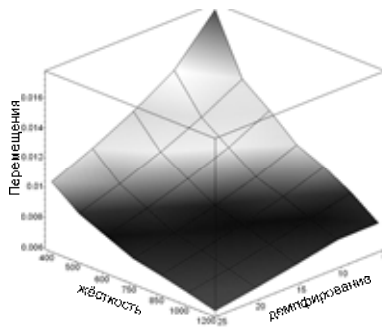


Рис. 17. Качественный вид поверхности вертикальных перемещений в контрольной точке на башне

Выводы. В статье была предложена методика проведения многовариантных расчётов динамического поведения подвески колёсной техники при воздействии одиночного выстрела и серии выстрелов. Методика основана на обобщенном параметрическом подходе к моделированию динамического процесса. Представленную методику можно применить не только для модернизации уже существующей техники, но и при создании новой.

Результаты, полученные для одиночного выстрела, можно использовать для выбора оптимальных характеристик подвески, а результаты, полученные при стрельбе очередью – для согласования характеристик подвески с характеристиками участвующего боевого модуля.

В дальнейшем предложенный подход планируется реализовать в виде специальных программных модулей для решения практических задач, возникающих в процессе проектирования и модернизации легкобронированных машин.

Список литературы: 1.. Васильев А.Ю., Малакей А.Н., Пелешко Е.В., Шаталов О.Е. К вопросу интегрированных систем анализа динамических процессов в корпусах транспортных средств специального назначения // *Механика та машинобудування*. – 2004. – №1. – С.51–60. 2. Большаков А.К., Емельянов В.В., Фесенко А.Ф., Семененко Н.В. О выборе и использовании бронетанковой техники в качестве базы под подвижные вооружения и военную технику // *Механика та машинобудування*. – 2004. – №1. – С.94–98. 3. Веретельник Ю.В., Миргородский Ю.Я., Пелешко Е.В., Ткачук Н.А. Параметрические модели элементов сложных систем как основа построения специализированных расчетных систем // *Механика та машинобудування*. – 2003. – №2. – С.3–7. 4. Пелешко Е.В. Применение обобщенно-параметрического подхода к анализу корпусов транспортных средств специального

назначения // Механіка та машинобудування. – 2005. – №1. – С.83–87. 5. Яблонский А.А. Курс теоретической механики. Часть 2. – М.: Высшая школа, – 1966. – 411 с. 6. Дуценко В.В., Якименко И.И. Математическое моделирование колебаний поддресоренного корпуса многоопорной колёсной машины по критериям „простота-адекватность” // Механіка і машинобудування. – 2004. – №2. – С.139-147. 7. Грунѳв С.Г., Багарсуков С.И., Мормило Я.М. Расчѳтно-экспериментальная оценка системы поддресорирования колёсных машин с подвеской типа БТР-70 // Механіка і машинобудування. – 2004. – №2. – С.128-133. 8. <http://morozov.com.ua>.

Поступила в редколлегию 12.11.2005

УДК 539.3:623.438

Г.Д.ГРИЦЕНКО, ГП “Завод им. Малышева”

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА РЕАКЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ИМПУЛЬСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПРИМЕРЕ КОРПУСА БРОНЕТРАНСПОРТЕРА

У статті запропонована математична модель для дослідження напружено-деформованого стану синтезу корпусів легкоброньованих машин, що піддаються дії зусиль стрільби. Розроблена математична модель містить опис всіх аспектів досліджуваних динамічних процесів, всіх якісних і кількісних особливостей самої досліджуваної динамічної системи, а також, при її подальшому розвитку, методи її оптимізаційного проектування.

In the article a mathematical model is offered for research of the stressedly-deformed state of synthesis of lightweight vehicles hulls, which are subjected to exertion of firing. The developed mathematical model contains description of all aspects of explored dynamic processes, all qualitative and quantitative features of the explored dynamic system, and also, at its further development, methods of its optimization design.

Введение. В настоящее время особую актуальность приобретает задача модернизации легкобронированных боевых машин (ЛБМ). Это требует, в свою очередь, моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) корпусов ЛБМ при действии различных нагрузок [1, 2].

Разработка математического аппарата для моделирования НДС корпусных элементов легкобронированных боевых машин не исчерпывает задачу анализа прочностных и жесткостных характеристик. Проблема заключается в том, что, как правило, аналитическое решение получаемой начально-краевой задачи возможно только для ограниченного числа областей сравнительно простой формы. Для корпусов боевых машин, имеющих чрезвычайно сложную структуру и состоящих из большого количества панелей разной толщины и формы, элементов усиления, вырезов, люков и т.д., применимы только численные методы решения. Из всех их разнообразия наиболее мощным и приспособленным для такого класса конструкций является метод конечных элементов (МКЭ) [3-5]

Метод конечных элементов, применяемый для исследования напряженно-деформированного состояния нагруженных деталей и узлов транспортных средств (ТС) и ориентированный на эффективное использование компьютеров, является мощным современным средством приближенного решения разнообразных задач математической физики. Для него характерны:

- широкий диапазон применимости;
- инвариантность по отношению к конструкции и механическим характеристикам материалов;
- простота учета взаимодействия конструкции с внешней средой.

В то же время анализ НДС элементов транспортных средств имеет свою специфику, обусловленную особенностями конструкции и нагружения ТС.

Анализ публикаций по тематике исследования напряженно-деформированного состояния корпусных элементов легких по массе боевых машин дает возможность сделать следующие выводы.

1. В литературе описаны общие подходы к решению задач данного класса при помощи метода конечных элементов.

2. Присутствует большое количество универсальных программных продуктов, позволяющих решать большинство задач в полуавтоматизированном режиме.

3. Отсутствуют методы и системы автоматизированного исследования прочности и жесткости корпусов боевых бронированных машин.

4. Практически не описаны в литературе методы создания специализированных систем для анализа и синтеза корпусов боевых бронированных машин по критериям прочности, жесткости, массы, тактико-технических характеристик.

5. Приведенные в публикациях решения частных задач дают представления только об отдельных сторонах исследуемого процесса реакции корпуса на импульсное воздействие. Однако положительным моментом является то, что в этих работах продемонстрирована сама принципиальная возможность решения задач анализа напряженно-деформированного состояния такого класса конструкций.

Таким образом, проведенный обзор состояния вопроса позволяет выделить направления исследований и определить направления исследований, определив тот достигнутый базовый научный уровень, от которого можно отталкиваться при постановке и решении задач исследований напряженно-деформированного состояния корпусов ЛБМ.

Постановка задач исследования. Анализ мировых и отечественных тенденций проектирования боевых модулей легких по массе боевых бронированных машин и методов исследования напряженно-деформированного состояния их корпусов позволяет заключить, что:

1. модули вооружения имеют тенденцию к росту общей массы, калибра вооружений темпа и углов стрельбы, что приводит к необходимости анализа напряженно-деформированного состояния корпусов при различных вариантах нагружения с целью рационального выбора конструктивных схем и па-

раметров при их проектировании;

2. в настоящее время для отечественного бронетанкостроения одним из наиболее актуальных направлений является развития направления модернизации боевых бронированных машин с установкой современных модулей вооружения;

3. практически отсутствуют в научной литературе методики исследования влияния различных факторов на напряженно-деформированное состояние корпусов легкобронированных машин, а также синтеза корпусов по критериям прочности и жесткости для обеспечения ТТХ за счет рационального выбора параметров проектируемых корпусов.

4. Для проектируемых, особенно модернизируемых конструкций корпусов боевых бронированных машин характерны растущая напряженность конструктивных элементов, а также самые неблагоприятные сочетания режимов боевого применения.

5. В настоящее время метод конечных элементов получил огромное развитие, в том числе реализацию в виде самых мощных CAE-систем, взаимодействующих с CAD-системами (Pro/ENGINEER, SolidWorks, CATIA, UG). В то же время отсутствуют специализированные интегрированные системы автоматизированного анализа и синтеза элементов корпусов боевых бронированных машин по критериям прочности и жесткости, что сдерживает решение этих задач параллельно и взаимосвязанно с процессами их проектирования.

Для решения поставленной задачи анализа напряженно-деформированного состояния и синтеза элементов корпусов легкобронированных боевых машин по критериям прочности необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка комплексной математической модели напряженно-деформированного состояния и динамических процессов в корпусе боевой машины при действии системы импульсов от усилия отдачи при производстве выстрелов.

2. Разработка специализированной интегрированной системы анализа и синтеза элементов корпусов боевых машин по критериям прочности, жесткости, обеспечения заданных тактико-технических характеристик.

3. Разработка множества параметрических моделей элементов корпусов боевых бронированных машин для вариативного анализа прочности и жесткости элементов конструкций.

4. Обеспечение тактико-технических характеристик проектируемых корпусов легкобронированных машин путем рационального выбора конструктивных схем и параметров на основе многовариантных исследований напряженно-деформированного состояния при варьировании конструктивных схем, конструктивных параметров ТТХ боевых модулей, а также режимов боевого применения.

5. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов корпусов боевых бронированных машин и оценка достоверности численных моделей на основе экспериментальных исследований.

Разработка рекомендаций по выбору рациональных вариантов модернизации корпуса и внедрение результатов исследований в производство.

Исходным пунктом исследований является разработка математической модели для исследования напряженно-деформированного состояния корпуса ЛБМ как сложной пространственной конструкции, подвергающейся воздействию импульсов различной интенсивности и частоты.

Формулировка соотношений для конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния корпусов ЛБМ. При исследовании напряженно-деформированного состояния корпусов ЛБМ с применением метода конечных элементов приходится решать не только краевую задачу, но и начально-краевую при действии импульсных сил. В этом случае все искомые и заданные функции зависят не только от пространственных координат, но и от времени. В этом же случае разрешающая система уравнений приобретает вид [3-5]:

$$M\ddot{\mathbf{u}} + C\dot{\mathbf{u}} + K\mathbf{u} = \mathbf{Q}, \quad (1)$$

где M – матрица масс;

C – матрица демпфирования;

K – матрица жесткости;

\mathbf{u} – вектор узловых перемещений;

$\dot{\mathbf{u}}$ – вектор узловых скоростей;

$\ddot{\mathbf{u}}$ – вектор узловых ускорений;

\mathbf{Q} – вектор узловых нагрузок.

Для решения данной системы предполагается использовать метод Ньюмарка:

$$\dot{\mathbf{u}}_{n+1} = \dot{\mathbf{u}}_n + \left[(1 - \delta)\ddot{\mathbf{u}}_n + \delta\ddot{\mathbf{u}}_{n+1} \right] \Delta t, \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{u}_n + \dot{\mathbf{u}}_n \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{\mathbf{u}}_n + \alpha \ddot{\mathbf{u}}_{n+1} \right] \Delta t^2, \quad (3)$$

где α, δ – параметры интегрирования метода Ньюмарка;

$\mathbf{u}_n, \mathbf{u}_{n+1}$ – вектор узловых перемещений,

$\dot{\mathbf{u}}_n, \dot{\mathbf{u}}_{n+1}$ – вектор узловых скоростей;

$\ddot{\mathbf{u}}_n, \ddot{\mathbf{u}}_{n+1}$ – вектор узловых ускорений в момент времени n и $n+1$ соответственно;

Δt – шаг интегрирования по времени метода Ньюмарка.

Используя пошагового представления решения по времени с применением формул (2), (3) дает возможность сформировать систему уравнений для определения искомых узловых параметров в последующий момент времени через их значения в предыдущий момент:

$$\begin{aligned} & \xi_0 M + \xi_1 C + K \mathbf{u}_{n+1} = \\ & = \mathbf{Q} + M(\xi_0 \mathbf{u}_n + \xi_2 \mathbf{u}_n' + \xi_3 \mathbf{u}_n'') + C(\xi_1 \mathbf{u}_n + \xi_4 \mathbf{u}_n' + \xi_5 \mathbf{u}_n''), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\xi_0 = \frac{1}{\alpha \Delta t^2}$; $\xi_1 = \frac{\delta}{\alpha \Delta t}$; $\xi_2 = \frac{1}{\alpha \Delta t}$; $\xi_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1$; $\xi_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1$; $\xi_5 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right)$.

Здесь параметры ξ_i представляют собой коэффициенты в выражениях узловых скоростей и ускорений в момент времени t_{n+1} через узловые значения параметров в момент времени t_n :

$$\mathbf{u}_{n+1}'' = \xi_0 (\mathbf{u}_{n+1} - \mathbf{u}_n) - \xi_2 \mathbf{u}_n' + \xi_3 \mathbf{u}_n'', \quad (5)$$

$$\mathbf{u}_{n+1}' = \mathbf{u}_n' - \xi_6 \mathbf{u}_n'' + \xi_7 \mathbf{u}_{n+1}'', \quad (6)$$

где $\xi_6 = \Delta t(1 - \delta)$, $\xi_7 = \delta \Delta t$.

Таким образом, совокупность решений последовательности систем уравнений (4) с учетом (5), (6) представляет собой общее решение начально-краевой задачи. Вся система соотношений (1) – (6) формирует математическую модель для анализа напряженно-деформированного состояния корпусов легкобронированных машин при динамическом воздействии реактивных сил при производстве выстрелов.

Моделирование реакции системы на ударное воздействие импульсов.

Естественно, что решение системы уравнений (1) при числе конечных элементов, исчисляемом десятками и сотнями тысяч, и количестве шагов по времени, исчисляемом сотням и тысячами, представляет собой довольно громоздкую задачу. В то же время качественные особенности исследуемого процесса можно предварительно исследовать на примере одномассовой динамической системы, подвергающейся действию системы периодических импульсов.

Рассмотрим подход, описанный в [6] для динамической системы с одной степенью свободы под действием набора импульсных нагрузок, следующих периодически, поведение которой описывается уравнением

$$m \ddot{v} + cv = 0, \quad (7)$$

где m, c, v – скаляры: масса, жесткость и обобщенная координата, описывающие поведение системы.

Его решение

$$v = \frac{S}{m p} \sin pt, \quad (t > 0), \quad (8)$$

($p = \sqrt{c/m}$) – частота свободных колебаний), которое удовлетворяет как уравнению (7), так и начальным условиям (т.е. условиям возникновения дви-

жения непосредственно после исчезновения начального импульса):

$$v = 0, \quad \mathfrak{v} = \frac{S}{m}. \quad (9)$$

Движение, вызываемое только следующим первым импульсом, можно получить из того же выражения (8) в виде:

$$v = \frac{S}{m p} \sin p(t-T), \quad (t > T). \quad (10)$$

Аналогично можно найти результат действия следующих импульсов. Чтобы получить общее движение, нужно сложить эти “парциальные” движения. Для одного типичного интервала времени $[nT, (n+1)T]$, т. е. между моментами приложения n -го и $(n+1)$ -го импульсов, имеем

$$\begin{aligned} v &= \frac{S}{m p} \sin pt + \sin p(t-T) + \sin p(t-2T) + \dots + \sin p(t-nT) = \\ &= \frac{S}{m p} \sum_{k=1}^{k=n} \sin p(t-kT). \end{aligned} \quad (11)$$

Для начала этого интервала времени, т. е. при $t = nT$, по выражению (11) находим

$$v = \frac{S}{m p} \sum_{k=0}^{k=n-1} \sin(n-k)pT \quad (12)$$

Одним из эффективных способов исследования качественных особенностей поведения данной системы описаны в [6]. Рассмотрим один из периодов T , приняв за начало отсчета времени момент исчезновения последнего импульса. В течение рассматриваемого периода колебания являются свободными и описываются решением

$$v = A \cos pt + B \sin pt, \quad (13)$$

Если v_0 – начальное смещение и \mathfrak{v}_0 – начальная скорость, то постоянные A и B равны

$$A = v_0, \quad B = \frac{\mathfrak{v}_0}{p}, \quad (14)$$

решение (13) можно записать в виде

$$v = v_0 \cos pt + \frac{\mathfrak{v}_0}{p} \sin pt. \quad (15)$$

Дифференцируя по времени t , находим скорость

$$\mathfrak{v} = -v_0 p \sin pt + \mathfrak{v}_0 \cos pt . \quad (16)$$

В конце этого периода, непосредственно перед приложением очередного импульса (т. е. $t = T$), имеем

$$v_1 = v_0 \cos pT + \frac{\mathfrak{v}_0}{p} \sin pT , \quad (17)$$

$$\mathfrak{v}_1 = -v_0 p \sin pT + \mathfrak{v}_0 \cos pT . \quad (18)$$

Сразу после приложения очередного импульса смещение v сохранит свое значение (17) :

$$v_2 = v_1 = v_0 \cos pT + \frac{\mathfrak{v}_0}{p} \sin pT , \quad (19)$$

но скорость мгновенно изменится на величину S/m , и при учете выражения (18) составит

$$\mathfrak{v}_2 = -v_0 p \sin pT + \mathfrak{v}_0 \cos pT + \frac{S}{p} . \quad (20)$$

Вследствие предполагаемой *периодичности* процесса величины v_2 и \mathfrak{v}_2 должны быть равны величинам v_0 и \mathfrak{v}_0 , т. е.

$$v_0 = v_0 \cos pT + \frac{\mathfrak{v}_0}{m} \sin pT , \quad (21)$$

$$\mathfrak{v}_0 = -v_0 p \sin pT + \mathfrak{v}_0 \cos pT + \frac{S}{m} . \quad (22)$$

Таким образом, получена система двух алгебраических уравнений с двумя неизвестными v_0 и \mathfrak{v}_0 ; решив ее, найдем

$$v_0 = \frac{S}{2m p} \operatorname{ctg} \frac{pT}{2}, \quad \mathfrak{v}_0 = \frac{S}{2m} . \quad (23)$$

и закон движения (13) принимает вид ($0 < t < T$)

$$v = \frac{S}{2m p} \left(\sin pt + \cos pt \cdot \operatorname{ctg} \frac{pT}{2} \right) . \quad (24)$$

Периодичность достигнута вследствие игнорирования заданных начальных условий (т. е. условий, относящихся к начальному моменту, непосредственно перед приложением первого импульса); в реальных системах благодаря демпфированию (которое не было учтено) в конце концов осуществляется именно такое периодическое движение. Впрочем, при желании можно отра-

зять в решении и действительно заданные начальные условия. Пусть в начальный момент времени заданные смещение и скорость соответственно составляют v_0^* и \dot{x}_0^* . Конечно, они отличаются от величин v_0 и \dot{x}_0 , которые относятся к чисто периодическому процессу и даны выражениями (24). Запишем тождества:

$$\begin{cases} v_0^* = v_0 + \left(v_0^* - \frac{S}{2mp} \operatorname{ctg} \frac{pT}{2} \right) \\ \dot{x}_0^* = \dot{x}_0 + \left(\dot{x}_0 - \frac{S}{2m} \right). \end{cases} \quad (25)$$

Первые слагаемые правых частей отвечают периодическому (с периодом T) движению (24), а вторые слагаемые послужат причиной свободных колебаний (с периодом $2\pi/p$)

$$v^* = \left(v_0^* - \frac{S}{2mp} \operatorname{ctg} \frac{pT}{2} \right) \cos pt + \left(\frac{\dot{x}_0^*}{p} - \frac{S}{2mp} \right) \sin pt. \quad (26)$$

Здесь время t отсчитывается от начала процесса. Таким образом, движение будет описываться суммой решений (24) и (26). Вторая часть имеет практическое значение в течение небольшого промежутка времени вблизи начала процесса. Полезно проанализировать результат, содержащийся в выражении (24). Прежде всего заметим, что если

$$\frac{pT}{2} = n\pi,$$

где n – целое, то $\left| \operatorname{ctg} \frac{pT}{2} \right| \rightarrow \infty$ и амплитуды перемещений стремятся к бесконечности, т. е. наступает ударный резонанс. Если $\omega = 2\pi/T$ – угловая частота приложения импульсов, то условие ударного резонанса приобретает вид

$$\omega = \frac{p}{n}. \quad (27)$$

При всех иных соотношениях частот отклонения оказываются конечными. Наибольшее отклонение системы согласно (24) равно

$$v_{\max} = \frac{S}{mp} \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \frac{pT}{2}} = \frac{S}{2mp} \left| \sin \frac{\pi p}{\omega} \right|. \quad (28)$$

Так как дробь $\frac{S}{2mp}$ есть максимальное отклонение, вызываемое одним мгновенным импульсом S , то выражение

$$\beta = \frac{1}{2 \left| \sin \frac{\pi p}{\omega} \right|} \quad (29)$$

можно назвать *коэффициентом влияния повторности*. На рис. 1 изображена зависимость β от отношения частот ω/p . Как видно, здесь возможно неограниченно большое число ударных резонансов (соответственно формуле (27)). Наименьшее возможное значение β равно $1/2$.

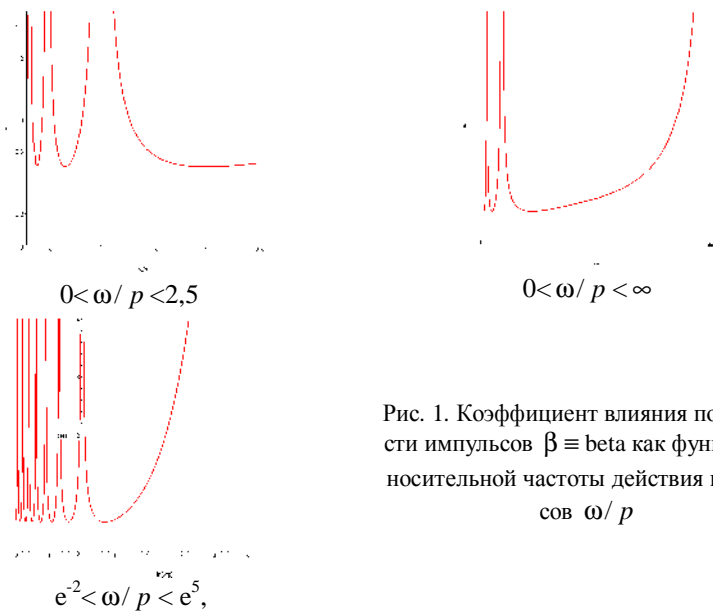


Рис. 1. Коэффициент влияния повторности импульсов $\beta \equiv \text{beta}$ как функция относительной частоты действия импульсов ω/p

масштаб полулогарифмический

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента чувствительности к действию системы импульсов от обратной относительной частоты возбуждения p/ω . Видно, что рост амплитуды установившихся колебаний происходит как с уменьшением периода действия импульсов, так и при его росте (при условии $p \approx \omega \cdot n$, где $n = 1, 2, 3, \dots$).

На рис. 3 – 4 приведены характерные динамические процессы: вдали от ударного резонанса и вблизи резонанса.

Качественный анализ приведенных картин показывает, что и характер переходного процесса, и его длительность, и характер установившегося дви-

жения очень сильно зависят от соотношения ω/p . Поскольку реальная динамическая система (исследуемый корпус бронетранспортера в процессе модернизации) обладает густым спектром собственных частот, причем этот спектр изменяется при внесении изменений в конструкцию, то полученные характеристики не могут быть применены для количественного, а только для качественного анализа.

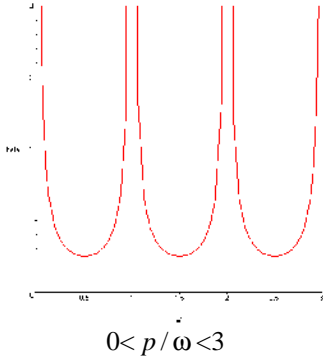


Рис. 2. Коэффициент влияния повторности импульсов $\beta \equiv \text{beta}$ как функция относительного периода действия импульсов p/ω

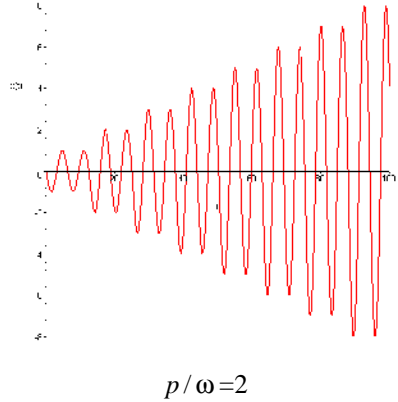


Рис. 3. Характерное временное распределение перемещения v при ударном резонансе

В то же время уже заранее можно предсказать характерные особенности динамических процессов в корпусе модернизируемого бронетранспортера БТР-80 при действии импульсов сил:

1) после относительно короткого переходного процесса при несовпадении ω с $p_i \cdot n$, где i – номера частот (от 1 до N_r), n – натуральное число, при

$$\omega_n \ll \omega \ll \omega_n \quad (\text{здесь}$$

$$\omega_n = \max_{i,n} \{p_i \cdot n : p_i \cdot n < \omega\};$$

$$\omega_n = \max_{i,n} \{p_i \cdot n : p_i \cdot n > \omega\}), \text{ на-}$$

ступает практически установившийся режим движения с преобладанием процесса с собственной частотой, ближайшей к частоте вынуждения;

2) при близости или совпадении ω с p_i , переходной процесс растягивается, а уста-

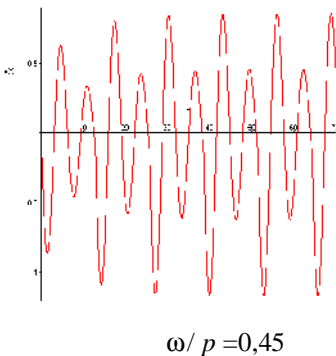


Рис. 4. Характерное временное распределение перемещения v при

новившийся представляет собой или биение, или почти периодический процесс с большой амплитудой;

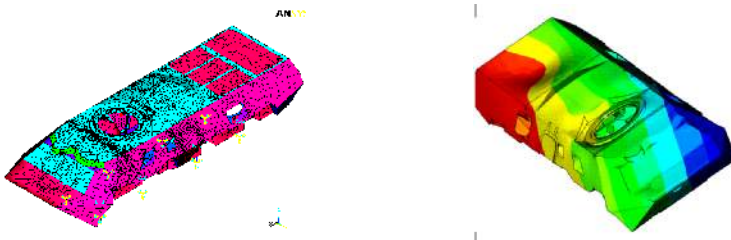
3) при $\omega \gg p_{N_e} \cdot n$ амплитуда установившихся колебаний растет практически пропорционально частоте вынуждающих импульсов.

Качественное сравнение результатов аналитического и численного моделирования реакции корпуса на импульсное воздействие. Поскольку при моделировании динамической системы одномассовым эквивалентом допускается чрезмерное упрощение массово-жесткостных свойств, которые в действительности представляют собой пространственные распределения, а не параметры, необходимо провести *качественное* сравнение результатов, полученных на основе упрощенной модели, с данными численного моделирования методом конечных элементов.

На рис. 5 приведены картины, характеризующие напряженно-деформированное состояние корпуса БТР-80УМ в момент времени после выстрела с некоторым эталонным усилием отдачи, на рис. 6-11 – характерные графики распределения вертикальных перемещений и угловых отклонений индикаторных точек БТР во времени.

Кроме диаграмм распределения перемещений и напряжений в фиксированный момент времени, построенная конечно-элементная модель позволяет наблюдать изменение контролируемых величин в индикаторных точках: вертикальное и суммарное перемещения оси цапф, а также вертикальные и суммарные перемещения задней и передней точки погона и др.

Как видно из представленных диаграмм, корпус в целом и отдельные его точки испытывают перемещения, в качественном отношении совпадающие с полученными ранее картинами распределений (см. рис. 3, 4). Видно, что при выбранном соотношении параметров корпуса ЛБМ и темпа стрельбы ударного резонанса не наблюдается. Это дает основание ввести некоторые типовые характеристики процесса деформирования корпуса в разных точках (рис. 12).



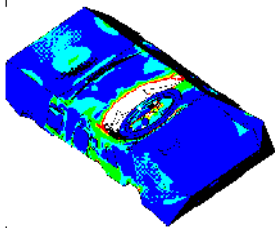


Рис. 5. Конечно-элементная модель корпуса бронетранспортера БТР-80 и диаграммы распределения перемещений и напряжений

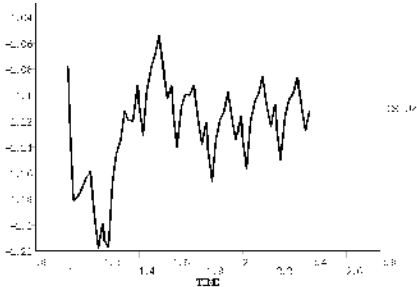


Рис. 6. Вертикальные перемещения оси цапф в зависимости от времени

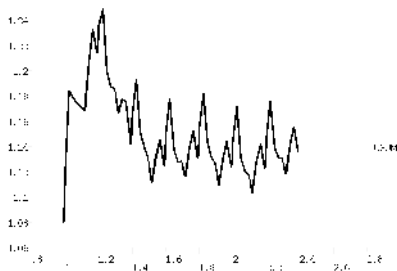


Рис. 7. Суммарные перемещения оси цапф в зависимости от времени

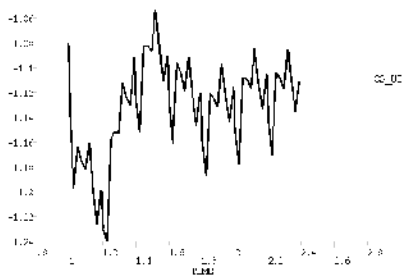


Рис. 8. Вертикальные перемещения задней точки погона в зависимости от времени

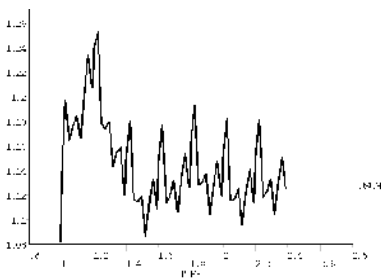


Рис. 9. Суммарные перемещения задней точки погона в зависимости от времени

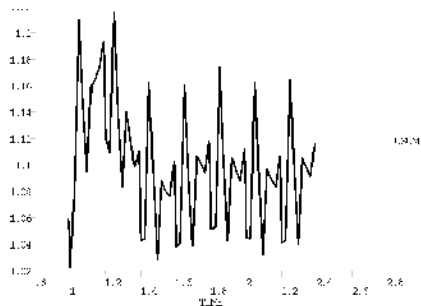
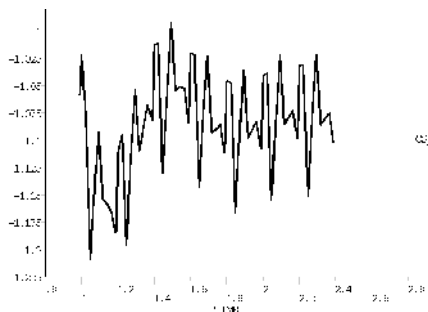


Рис.10. Вертикальные перемещения передней точки погона в зависимости от времени

Рис.11. Суммарные перемещения задней точки погона в зависимости от времени

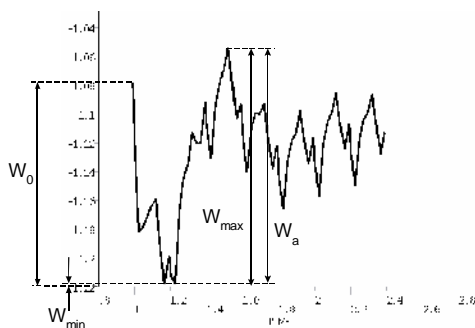


Рис. 12. Диаграммы вертикальных перемещений оси цапф во времени: w_0 – начальное значение вертикального перемещения оси цапф при действии сил тяжести в начальный момент времени; w_{\min} – минимальное значение вертикального перемещения оси цапф; w_{\max} – максимальное значение вертикального перемещения оси цапф; w_a – амплитуда колебаний оси цапф при производстве серии выстрелов

При этом отслеживаются различные характеристики переходного процесса в корпусе. Установившийся процесс отличается меньшими амплитудами колебательного процесса.

Таким образом, в принципе получено удовлетворительное качественное соответствие распределений на моделях различной размерности. Это свидетельствует о том, что отдельные характерные показатели реакции исследуемой системы на серию импульсных воздействий можно выявить на небольших моделях.

Заключение. В статье предложена математическая модель для исследования напряженно-деформированного состояния синтеза корпусов легкобронированных машин, подвергающихся действию усилий стрельбы. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Предложенная математическая модель отличается от использованных ранее для исследования напряженно-деформированного состояния корпусов легкобронированных машин строгой математической формулировкой задачи анализа прочностных и жесткостных характеристик при периодических импульсных воздействиях.
2. Разработанная математическая модель отличается тем, что содержит эле-

менты качественного анализа реакции системы на импульсные воздействия.

3. Проведенный предварительный анализ позволяет выделить три типа поведения исследуемой динамической системы при длительном импульсном воздействии и малом вязком трении: ударный резонанс; нерезонансный режим; сверхвысокочастотное импульсное воздействие.

4. Получено полное качественное соответствие результатов моделирования реакции корпуса БТР-80 с применением упрощенной и подробной динамических его моделей.

Для полного решения задачи многовариантного анализа и синтеза предложенная математическая модель нуждается в дальнейшем развитии:

- необходим инструмент автоматизированного генерирования численных моделей (включая геометрическую информацию, тактико-технические характеристики боевых модулей, ТТХ модернизируемого бронетранспортера) по ограниченному набору основных параметров;
- требуется создание средств “конденсации” прочностных и жесткостных параметров по результатам расчета динамических процессов.

Таким образом, впервые поставлена в строгой математической постановке задача анализа напряженно-деформированного состояния корпусов модернизируемых легкобронированных машин под действием усилий стрельбы.

Разработанная математическая модель содержит описание всех аспектов исследуемых динамических процессов, всех качественных и количественных особенностей самой исследуемой динамической системы, а также, при ее дальнейшем развитии, методы ее оптимизационного проектирования.

Список литературы. 1. *Холявский Л. Г.* Энциклопедия бронетехники. Гусеничные боевые машины // 2001. – 656 с. 2. *Шунков В. Н.* Бронетехника. – Минск: Попурри. – 2000. – 445 с. 3. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541с. 4. *Стренг Г., Фикс Дж.* Теория метода конечных элементов. – М.: Мир, 1977. – 349 с. 5. *Норри Д., де Фриз Ж.* Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981.- 304 с. 6. *Пановко Я.Г., Губанова И.И.* Устойчивость и колебания упругих систем. – М.: Наука, 1979. – 384 с.

Поступила в редколлегию 02.12.2005

УДК 621.01

Е.И.ЗИНЧЕНКО, А.А.ЗАРУБИНА, канд. техн. наук, НТУ “ХПИ”

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТЕЙШИХ ДВУХПОВОДКОВЫХ МЕХАНИЗМОВ И СРАВНЕНИЕ ИХ С КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ БАЗОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

В статті наведені результати кінематичного дослідження механізмів другого порядку: шарнірно-

го чотириланковика і кривошипно-повзунного механізму. Введено поняття базового механізму. Порівняно результати кінематичних досліджень механізмів другого порядку з результатами кінематичних досліджень базових механізмів.

In the article the results of kinematics research of mechanisms of second order are given: joint four-tier mechanism and crank-slide mechanism. The concept of basic mechanism is entered. The results of kinematics researches of mechanisms of the second order are compared with the results of kinematics researches of basic mechanisms.

Актуальность. Вопрос об исследовании кинематических параметров простейших механизмов второго порядка рассматривается в свете вопроса о создании новой теории синтеза и кинематического анализа более сложных механизмов с выстоем выходного коромысла или ползуна, а именно, механизмов четвертого класса. На сегодняшний день эта задача очень актуальна, поскольку известны лишь графоаналитические методы синтеза и анализа механизмов четвертого класса либо наброски теорий без приведения целостной картины расчета таких механизмов [1, 2]. Рассматриваемые в работах [3, 4] шестизвенные механизмы четвертого класса являются механизмами второго порядка, аналогично простейшим четырехзвенным и кривошипно-ползунным, рассматриваемым в этой статье. В работе [5] разработана теория синтеза и кинематического анализа кулисных механизмов с криволинейными пазми для качающейся кулисы и кулисы, совершающей поступательное движение, а также вводится предположение о кинематической эквивалентности таких механизмов и механизмов второго порядка. В данной статье проверяется это предположение для того, чтобы иметь возможность интерпретировать механизмы четвертого класса как кулисные, для которых разработана теория синтеза и кинематического анализа.

Объекты исследований. Объекты исследований – шарнирный четырехзвенный механизм и кривошипно-ползунный механизм, базовый механизм для шарнирного четырехзвенного механизма и базовый механизм для кривошипно-ползунного механизма. Рассмотрим кинематические схемы простейших двухповодковых механизмов: шарнирного четырехзвенника (ШЧ) и кривошипно-ползунного механизма (см. рис.1, 2).

Введем понятие базового механизма. Базовый механизм – это кулисный механизм с прямолинейным пазом. Для механизма, изображенного на рис.1, базовый механизм представлен на рис.3, а для механизма, изображенного на рис.2, базовый механизм представлен на рис.4.