

Н.А. ТКАЧУК, докт. техн. наук, НТУ “ХПИ”,
Г.Д. ГРИЦЕНКО, канд. техн. наук, ГП “Завод им. Малышева”,
Я.Н. БАРАНИКОВ, КП “Харьковское конструкторское бюро по машиностроению им. А.А.Морозова”,
А.В. ЛИТВИНЕНКО, канд. техн. наук, Головной специализированный конструкторско-технологический институт, г. Мариуполь

К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОБИВАНИЯ ПРЕГРАД

У статті описано ефективну технологію автоматизації досліджень процесу пробиття бронеперешкод. Створено методику та спеціалізований модуль, що інтегрує розрахунки в системах ANSYS, LS-DYNA. Проведено тестові розрахунки.

In the article effective technology of automation of research process of armor obstacles breaching is described. A method and specialized module which integrates calculations in ANSYS and LS-DYNA systems are created. Test computations are conducted.

Актуальность задачи. Актуальность вопроса моделирования процессов разрушения бронированных преград обусловлена и необходимостью повышения защищенности боевых машин, и созданием разнообразных средств индивидуальной защиты, и кроме того, постоянным ростом характеристик средств поражения. Это вынуждает проводить многовариантные испытания средств бронезащиты. Представляется целесообразным для уменьшения времени на их разработку создать специализированные системы автоматизированного моделирования процессов пробивания преград, что и составляет предмет данной работы.

Состояние вопроса. Моделирование процесса взаимодействия в системе “снаряд-броня” является одним из наиболее сложных в механике разрушения. Подходы к решению данной задачи могут быть различными: получение эмпирических зависимостей при обработке данных экспериментальных исследований; использование общих подходов, основанных на рассмотрении энергетического баланса; использование численных методов.

В частности, для численного решения задач данного типа наиболее целесообразно применение самого мощного из современных численных методов механики твердого тела – метода конечных элементов (МКЭ). Вопросам применения МКЭ и других методов к решению различных задач посвящены работы [1-12].

Отмечается [3], что для полного описания динамики соударения твердых тел необходимо учитывать их форму, распространение упругих, пластических и ударных волн, гидродинамическое течение материала, конечные деформации и деформирование, упрочнение, тепловые эффекты и влияние трения, а

также возникновение и распространение зон разрушения в материале соударяющихся тел. Теоретический подход был бы здесь не только в высшей степени громоздким, но и потребовал таких сведений о поведении материалов в условиях нагружения с большими скоростями деформации, которые практически получить невозможно. Поэтому большая часть исследований в этой области ведется экспериментальными методами и путем численного моделирования методом конечных элементов.

Проникание можно определить как вход тела в мишень без сквозного пробивания последней. В общем случае метаемое тело застревает в мишени, и в ней образуется воронка. Если снаряд отскакивает от поверхности мишени или проникает в нее по криволинейной траектории, а затем выходит из нее с меньшей скоростью, то такое явление называется рикошетом. В противоположность этому при пробивании снаряд насквозь проходит мишень. Характерная продолжительность процессов проникания и пробивания от нескольких микросекунд до сотен микросекунд. Обычно и мишени, и снаряды в процессе соударения сильно деформируются. Рассмотрим процессы, происходящие в снаряде и мишени во время соударения. Можно считать, что снаряд представляет собой длинное цилиндрическое тело с конической, оживальной, полусферической или плоской передней частью. При попадании такого снаряда в мишень в обоих телах образуются и распространяются сильные волны сжатия. Если скорость соударения достаточно велика, возникающие и распространяющиеся внутрь снаряда от его свободных боковых поверхностей волны разгрузки, пересекаясь вблизи оси снаряда, будут создавать зону высоких растягивающих напряжений. В этой зоне в достаточно хрупких материалах, таких, как высокопрочные стали, может произойти разрушение. Этот эффект проявляется сильнее, если в материале снаряда вблизи его продольной оси имеются поры или другие неоднородности. Если снаряд попадает в преграду по нормали к ее поверхности, то развивается двумерное напряженное состояние. При ударе под углом к нормали задача усложняется, так как в результате асимметричного нагружения возникают изгибающие напряжения. При определенном сочетании формы снаряда, характеристик материалов снаряда и мишени, а также скорости соударения совместное действие изгибающих и растягивающих напряжений может привести к разрушению снаряда или рикошету.

За волной сжатия в материале мишени сразу же следует волна разгрузки. Когда начальная волна сжатия достигает свободной поверхности мишени, образуется еще одна волна разгрузки. При определенном сочетании величины напряжения (растягивающего) и продолжительности его действия, превышающем критическое значение для материала мишени, последняя начинает разрушаться.

Удобна следующая система классификации мишеней [3]: *полубесконечная*, если ее тыльная поверхность не влияет на процесс проникания; *толстая*, если влияние тыльной поверхности сказывается лишь после того, как снаряд пройдет в материале мишени значительное расстояние; *промежуточной*

толщины, если тыльная поверхность мишени оказывает значительное влияние на процесс деформации в течение почти всего времени движения снаряда в материале мишени; *тонкая*, если напряжения и деформации постоянны по толщине мишени.

Материалы сталкивающихся тел могут разрушаться по-разному. Действительный механизм разрушения зависит от таких переменных, как свойства материала, скорость соударения, форма снаряда, способ крепления мишени и относительные, размеры снаряда и мишени. На рис. 1, заимствованном из работе [3], показаны некоторые основные типы разрушения тонких мишеней и мишеней промежуточной толщины. Хотя один из типов разрушения может быть доминирующим, чаще встречаются их комбинации.

Откол, т.е. разрушение под действием растягивающих напряжений, возникающих при отражении начальной волны сжатия от тыльной поверхности пластины конечной толщины, обычное явление при взрывных или ударных нагружениях, в особенности материалов, лучше работающих на сжатие, чем на растяжение. Развитый откол внешне выглядит аналогично, однако в этом случае разрушение обусловлено большими деформациями и форма поверхности откола определяется локальными неоднородностями и анизотропией материала. Сколовое разрушение происходит, когда напряжения в начальной волне превышают предел прочности материала, и наблюдается в мишенях из малопрочных и малоплотных материалов, тогда как образование радиальных трещин обычно для материалов, прочность которых на растяжение гораздо меньше их прочности на сжатие, например для керамики.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования были посвящены изучению пробивания мишеней с образованием пробки. При попадании снаряда с затупленной или полусферической передней частью в мишень конечной толщины со скоростью, близкой к баллистическому пределу, из мишени выбивается почти цилиндрическая пробка, диаметр которой практически равен диаметру снаряда. В этом случае форма и движение снаряда таковы, что заставляют материал мишени смещаться в основном на-

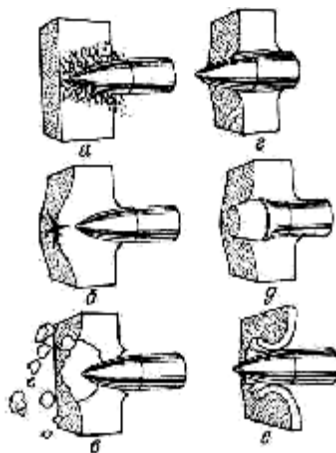


Рис. 1. Виды разрушения мишеней [3]:

- a* – хрупкое разрушение;
- б* – разрушение с образованием радиальных трещин;
- в* – дробление; *г* – пластическое расширение отверстия;
- д* – выбивание пробки;
- е* – образование лепестковой пробки

правлении движения снаряда. Отделение от мишени пробки может произойти по обычному механизму разрушения, т.е. путем возникновения пор и их роста при сдвиге или по другому механизму, известному как *адиабатический сдвиг*, для которого характерно развитие узких полос интенсивного сдвига. Обычно считают, что неустойчивость типа адиабатического сдвига развивается в месте концентрации напряжений в твердом теле, напряженное состояние которого в целом однородно. Работа пластической деформации почти полностью превращается в тепло, которое из-за высоких локальных скоростей деформации не успевает распространиться на существенное расстояние от зоны пластических деформаций (например, в работе [3] указывается, что скорости деформации сдвига в полосах адиабатического сдвига достигают 10^7 с⁻¹, а температура 10^5 С). В результате температура в зоне поднимается, это вызывает дополнительное пластическое течение и дальнейшую концентрацию локальных пластических деформаций. Развитие этого процесса приводит к распространению по материалу узкой полосы значительных пластических деформаций вдоль плоскостей максимальных напряжений сдвига или минимальной прочности материала до тех пор, пока не произойдет разгрузка или пока в материале не образуется сколовая трещина. При скоростях соударения, превышающих баллистический предел более чем на 5-10%, вместо одной пробки обычно образуется несколько осколков. Образование пробки при пробивании мишени весьма чувствительно к углу соударения и форме головной части снаряда.

Чтобы полностью решить задачу о соударении, приходится прибегать к численному решению полных уравнений механики сплошной среды. Методы конечных разностей и конечных элементов позволяют решать полные системы уравнений в частных производных, обладают большей гибкостью, чем разнообразные алгебраические уравнения, и позволяют точно моделировать переходные процессы. Строго говоря, они также являются приближенными (решаются системы конечно-разностных уравнений, а не сами дифференциальные уравнения), однако в настоящее время погрешности, обусловленные неточным знанием свойств материалов, во много раз больше погрешностей, присущих самим численным методам.

Упомянутые методы, алгоритмы и программные продукты, их реализующие, представляют собой лишь небольшую часть материала от обширного объема публикаций по этой тематике. Однако даже на основании этого мозаичного анализа можно сделать однозначный вывод об актуальности задачи моделирования процесса бронепробивания. Кроме того, в настоящее время отсутствуют универсальные подходы и модели для решения поставленной задачи.

Анализ возможности применения пакета LS-DYNA для расчета процессов пробивания преград на примере решения тестовых задач. Рассмотрим возможности пакетов конечно-элементного моделирования на примере пробивания преград из композитов.

Обычно в таких исследованиях делаются такие допущения [3]:

1. **Влияние соударения локально.** Предполагается, что в соударении участвует лишь небольшая часть мишени, размеры которой сравнимы с диаметром снаряда. Остальная часть мишени в соударении не участвует.

2. **Перемещениями абсолютно твердого тела можно пренебречь.**

3. **Тепловые явления можно не учитывать,** т.е. можно пренебречь трением, нагреванием ударной волной и изменением свойств материала.

4. **В начальный момент мишень свободна от напряжений.**

Особенности применения композиционных материалов (КМ) при проектировании бронезащиты определяются их способностью эффективно гасить энергию движения. При отслаивании волокон от матрицы затрачивается энергия, поэтому для армированных КМ характерны такие механизмы повышения вязкости разрушения, которых нет у гомогенных материалов. Эти механизмы связаны с наличием в КМ большого числа поверхностей раздела, которые являются тормозом на пути развития трещин. Применение только лишь одной арматуры без связующего исключает это важнейшее свойство КМ. При отверждении связующего в КМ имеется возможность вносить начальные напряжения и управлять их величиной и характером. Опять же применение КМ без связующего исключает данную возможность.

На сегодняшнее время выбор композитов очень богат. Композиты могут быть как традиционными – арамидные типа Кевлар, углеродные типа Торнел, стекловолокнистые и т.д., так и с металлической матрицей и с минеральными волокнами [3]. Прочность разных КМ варьируется в широких пределах (рис. 2). Даже прочность КМ в своем классе сильно зависит от технологии его

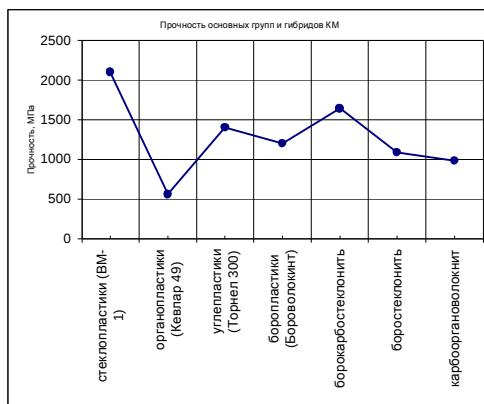


Рис. 2. Пределы прочности основных групп и гибридов КМ

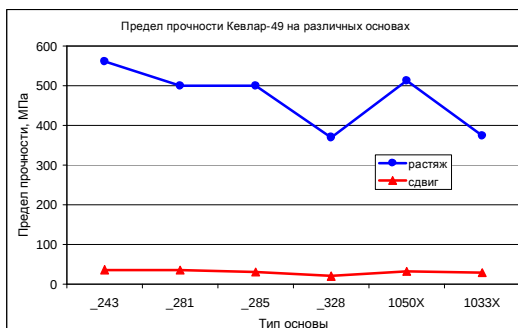


Рис. 3. Прочность Кевлара в зависимости от

изготовления (рис. 3). Традиционные КМ уступают по прочности более современным, таким как бороваолокниты (борокарбостеклонить прочнее Кевлара в 2,9 раз).

Боропластики применяют в том случае, когда требуется высокая прочность на сжатие, что соответствует проектированию бронезащиты. Гибридные КМ типа Торнел/Кевлар также обладают существенно более высокой прочностью на сжатие, чем обычный органокомпозит.

За прошедшее десятилетие известными ведущими институтами и кампаниями был разработан ряд численных методов расчета быстропротекающих процессов, к которым относятся и процесс пробивания преград. В настоящее время хорошо отработанный и экспериментально проверенный программный продукт LS-DYNA применяется на всех иностранных предприятиях, занимающихся проектированием и производством вооружения. Беглый обзор зарубежной печати, например такой обширной научной библиотеки, как “Scientific and Technical Information Network” (STINET по адресу <http://stinet.dtic.mil/>), показывает, что расчеты процессов пробивания различных изделий и их компонентов стали стандартом проектирования, без которых не допускается к изготовлению ни одно военно-промышленное изделие.

В настоящее время российскими учеными активно разрабатываются методы решения аналогичных задач для своей промышленности. Значительные успехи в теоретических расчетах процессов пробивания демонстрируются на ежегодных съездах специалистов России, работающих в области современных методов расчета. Одна из таких работ [9] наглядно демонстрирует результаты разработки методов расчета процессов пробивания различными пулями преград из однородных материалов, металлокерамик и различных композитов. Рассмотрены эффекты рикошета и в общих чертах описаны современные математические модели решения этих задач с применением программного комплекса LS-DYNA. При всей доступности общего характера информации в такого рода публикациях, специфические, ключевые и представляющие практический интерес параметры, как правило, тщательно скрываются. Это объясняется большими финансовыми и трудовыми затратами на разработки таких наукоемких современных методов, которые естественно представляют промышленное “ноу – хау”. В этом случае предприятия, отрасли и государства, не развивающие в своих пределах таких направлений, рискуют навсегда отстать в области проектирования оптимальных бронезащит.

В рамках данной работы был проведен анализ возможностей современного программного пакета LS-DYNA для расчета процессов пробивания различных материалов. В работе рассмотрены такие материалы как Кевлар, стеклопластик C-I19-55, E-glass, S-glass, т.е. те материалы, по которым удается узнать свойства из доступных источников печати [8, 9-12]. В процессе исследования была создана математическая модель преграды, состоящая из пяти слоёв перекрёстно армированного композиционного материала. В пре-

граду направлен стальной шар массой 2г со скоростью 200 м/сек. Результат пробивания преграды из различных композиционных материалов представлен на рис. 4.

Для сравнения со стальной гомогенной преградой из обыкновенной стали, был проведен аналогичный расчет для пяти листов стальной преграды и 13-ти листов композиционной. Определено, что во всех случаях осколок не пробивает преграду, но имеется существенная экономия веса преграды, которое иллюстрирует рис. 5.

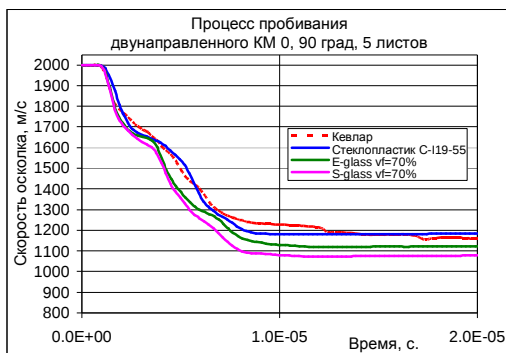


Рис. 4. Изменение скорости шара массой 2 г при прохождении пакета композиционного материала из 5 листов толщиной 2.4 мм каждый, перекрестно-армированного семи слоями

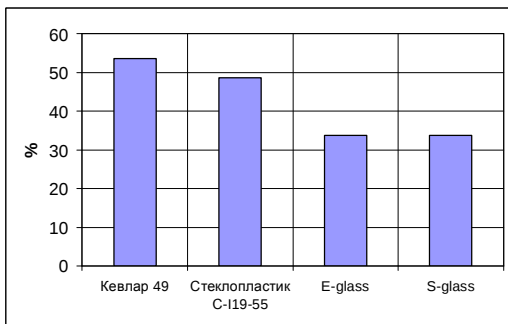


Рис. 5. Снижение массы, в процентах от аналогичной стальной преграды, набранной из 5 листов по 2.4 мм каждый

На рис. 6 представлен характер процесса пробивания по результатам решения тестовой задачи о внедрении кинетического снаряда в преграду (сталь – сталь). Качественный характер результатов численного моделирования соответствует экспериментальным данным о внедрении снаряда в бронезащиту [3].

Закключение. Обзор доступных публикаций в научно-технических изданиях, монографиях, *Internet* позволяет утверждать, что, во-первых, интерес к данному направлению исследований очень велик, а, во-вторых, задача сама по себе масштабна и многогранна. Она требует привлечения больших ресурсов для разработки теоретического аппарата, создания соответствующих методов, алгоритмов и привлечения современных конечно-элементных пакетов.

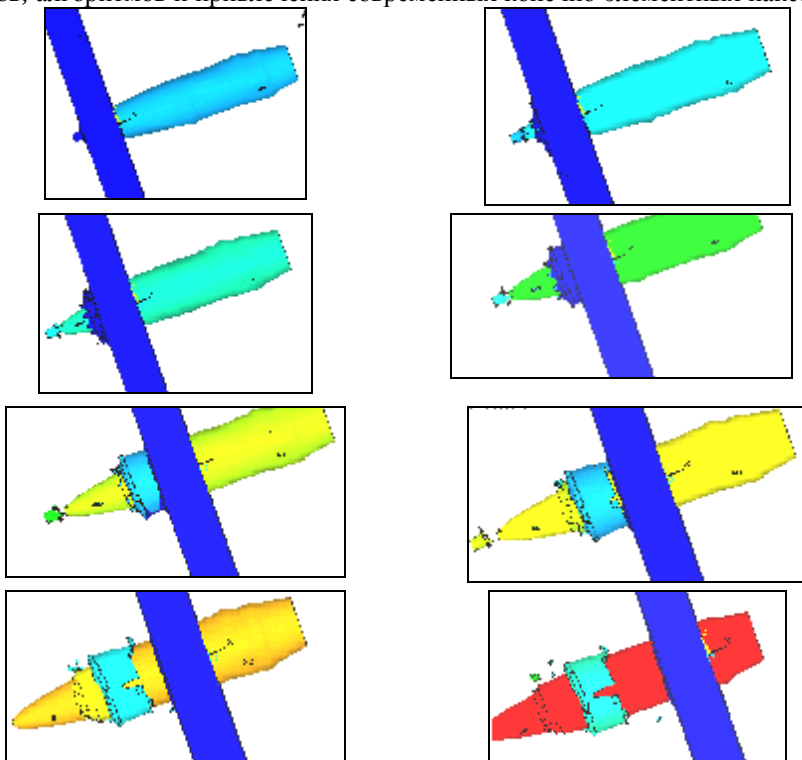


Рис. 6. Стадии внедрения снаряда в преграду

Оценка эффективности комплекса LS-DYNA для расчета процессов пробивания преград показала, что даже на постановочном, весьма приближенном уровне расчеты дают прогнозы по существенному снижению массы преграды без потери её эффективности. Кроме того, на примере решения ряда тестовых задач продемонстрированы возможности и преимущества интегрированной технологии автоматизированного исследования процесса разрушения защитного материала на внедрении индентора, основанной на соединении преимуществ специализированных программных модулей и универсальных CAE-систем ANSYS и LS-DYNA.

В дальнейшем предполагается развивать созданную технологию инте-

грації для об'єднання можливостей спеціалізованого і універсального програмного забезпечення.

Список литературы. 1. Физика взрыва / Под ред. К.П.Станюковича. – М.: Наука, 1975. 2. Трощенко В. Т., Лебедев А. А., Стрижало В. А., Степанов Г. В., Кривенюк В. В. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения / НАН Украины. Ин-т пробл. прочности. – К.: – 2000. – 366 с. 3. Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х. Р., Гришук Л.Б., Куран Д.Р. Динамика удара. – М.: Мир, 1985. – 296 с. 4. Харченко В.В., Майстренко А.П., Бабуцкий А.И., Кондряков Е.А. Особенности деформирования и разрушения пластин из хрупких материалов при ударном нагружении // Проблемы прочности. – 2002. – №3. – С.86-91. 5. Горельский В.А. Численное моделирование при ударе по нормали и под углом к поверхности преграды // Проблемы прочности. – 2002. – №3. – С.109-113. 6. Степанов Г.В., Zubov B.II., Токарев В.М., Дроздов А.В., Клепачко Я.Р. Прочность тонколистового элемента конструкции из композиционного материала при ударном растяжении // Проблемы прочности. – 2001. – №1. – С.38-48. 7. Садовский В.М. К теории ударных волн в сжимаемых пластических средах // Изв. РАН. Мех. тверд. тела. – 2000. – №5. – С.87-95. 8. Композиционные материалы. Справочник. // В.В.Васильев., В.Д.Протасов., В.В.Болотин. и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с. 9. Боровков А.И. Возможности системы конечно-элементного моделирования ANSYS/LS-DYNA // Первая междунар. Конф. пользователей програмного обеспечения ANSYS. 22-23 октября 2003 г. EMT-ANSYS-центр, Москва. Dynamical contact interaction. 10. L.L.Clements, R.L.Moore. Composite properties for E-glass in a room temperature curable epoxy matrix. Lawrence Livermore laboratory, 1977. 11. L.L.Clements, R.L.Moore. Composite properties for S-2-glass in a room temperature curable epoxy matrix. Lawrence Livermore laboratory, 1978. 12. L.L.Clements Problem testing aramid/epoxy composites. Lawrence Livermore laboratory, 1977.

Поступила в редколлегию 11.01.2006

УДК 539.3:612.76

М.А.ТКАЧУК, докт. техн. наук, **Ю.В. ВЕРЕТЕЛЬНИК**, НТУ “ХПІ”,
В.К. ПІОНТКОВСЬКИЙ, Інститут патології хребта та суглобів
ім. професора Сітенка

БІОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ: УЗАГАЛЬНЕНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ ОПИС

Стаття присвячена проблемі розвитку узагальненого параметричного підходу для дослідження елементів біомеханічних систем. Були розроблені параметричні моделі, що дозволяють змінювати конструкції ендопротезів, властивості елементів біомеханічних систем та робити обґрунтований вибір ендопротезу за критеріями міцності та жорсткості у відповідності з властивостями живих тканин.

The paper is devoted to the problem of development of generalized parametrical approach to research of biomechanical systems elements. Parametric models has been worked out allow to vary endoprosthesis constructions, properties of the elements of biomechanical systems and perform the based choice of endoprosthesis on the criteria of firmness rigidity and accordance with the properties of live tissues.

Стан проблеми. На даний час підвищення ефективності оперативного втручання для ендопротезування опорно-рухового апарату стримується відсутністю засобів передопераційного моделювання самої операції, розрахунків

міцності та жорсткості елементів, а також прогнозування поведінки опорно-рухового апарату після операції в реальних умовах життєдіяльності людини. В той же час росте потреба в таких операціях в усьому світі. Це приводить до необхідності розробляти принципово нові схеми операцій. Параметри ендопротезів та схеми оперативного втручання при цьому відпрацьовуються протягом тривалого часу. В той же час при цьому утруднено врахування індивідуальних особливостей пацієнта. Всі ці проблеми може усунути комп'ютерне об'ємне параметричне моделювання.

У НТУ „ХПІ” та Інституті патології хребта та суглобів ім. проф. Сітенка протягом останніх десятиріч склалися наукові школи та колективи, які значно просунулися у вирішенні даної актуальної наукової проблеми.

При розв'язанні задачі враховувалися наступні найбільш вагомні світові досягнення в даній галузі: розроблені потужні системи ендопротезів різних типів для оперативного лікування травм та патологій хребта та комп'ютерного моделювання (CAD: Pro/ENGINEER, CATIA, UG, SolidWorks); створені системи комп'ютерного скінченно-елементного моделювання напружено-деформованого стану (CAE: ANSYS, NASTRAN, LS-DYNA-3D, Pro/MECHANICA); розроблено методи дослідження напружено-деформованого стану елементів хребта; створені комп'ютерні системи навігації при проведенні мікрохірургічних операцій. Вчені США, Європи, Японії, Канади та країн СНД приділяють багато уваги розробці моделей та методів проектування та дослідження елементів хребта, ендопротезів різних типів.

На цю тему є багато публікацій в журналах ASME Journal of Biomechanical Engineering (ASME), The Spine Journal (Lippincott Williams & Wilkins), European Spine Journal (Springer-Verlag Heidelberg), Journal of Biomechanics (Elsevier), Journal of Orthopaedic Research (Elsevier), Computer Methods and Programs in Biomedicine (Elsevier), Computerized Medical Imaging and Graphics (Elsevier). Розробкою та виготовленням ендопротезів займаються фірми DePuy Spine, Disc Dynamics, Abbott.

Окремий бік проблеми – розробка систем комп'ютерного моделювання та дослідження складних систем. Фірми PTC, Dassault Systems, UGS, LSTC, ANSYS Inc, MSC Software розробили потужні комп'ютерні системи Pro/ENGINEER, CATIA, UG, SolidWorks, ANSYS, NASTRAN, LS-DYNA3D, Pro/MECHANICA. Вони являють собою потужні інструменти для створення параметричних моделей складних механічних систем.

Постановка задачі. Аналіз вітчизняної і зарубіжної літератури останнього десятиліття показав, що кількість матеріалів (і конструктивних рішень), що використовуються як заміники біологічних тканин, зокрема для протезування дефектів хребетного стовпа, постійно збільшується. Основна мета хірургічного втручання полягає в отриманні більшої механічної стабільності, підвищенні ймовірності утворення кісткового блоку і поліпшенні клінічних результатів [1, 2].

Велике розповсюдження операцій ендопротезування, які використовуються при захворюваннях і пошкодженнях хребта, коли виникає необхідність видалити його частину і замістити дефекти, що утворилися, а також відносно великий процент незадовільних результатів, визначають жорсткі вимоги до ендопротезів хребта: зберігання корекції деформації, відновлення і зберігання опорної функції не викликаючи негативних наслідків (реакцій тіл хребців), травмування тіл хребців, які розміщені вище і нижче встановленого ендопротеза [3]. Остання вимога може бути реалізована тільки за умови, коли механічні характеристики ендопротеза рівні або близькі до механічних характеристик тіл хребців конкретного пацієнта.

У зв'язку з вищезгаданим є необхідність урахування при оперативному лікуванні індивідуальних особливостей пацієнтів і обґрунтованого підбору конструкцій і параметрів ендопротезів. Це дозволить успішно проводити операції навіть в тих випадках, які до теперішнього моменту були неоперабельні. У ідеальному випадку необхідно врахувати всі особливості кожної конкретної патології. Природно, це неможливо. Тому гостро стоїть питання урахування мінімально можливої кількості параметрів для обґрунтованого підбору конструкції і параметрів ендопротеза.

Основна проблема, що на даний час не вирішена – відсутність методів вирішення проблеми синтезу оптимальних ендопротезів та схем оперативного лікування травм (патологій) хребта з урахуванням *індивідуальних* особливостей пацієнтів.

Методика досліджень. Для вирішення проблеми пропонується розробити *комп'ютерну систему для моделювання хірургічних операцій ендопротезування хребта та дослідження напружено-деформованого стану елементів системи „хребет – ендопротез”*.

Це дасть змогу оптимально підбирати параметри ендопротезів та схеми хірургічних операцій з урахуванням індивідуальних особливостей пацієнтів. Для досягнення мети необхідні наступні дослідження: геометрії та створення бази даних *параметричних* моделей елементів хребта; типів конструкцій *ендопротезів* та створення бази даних їх параметричних моделей; дослідження, класифікація та створення бази даних *травм (патологій) хребта*; розробка *математичної моделі* для параметричного опису поведінки біомеханічної системи „елементи хребта – ендопротез”, *загальної параметричної моделі* біомеханічної системи „елементи хребта – ендопротез” та *комп'ютерної системи* для моделювання *геометрії* та *напружено-деформованого стану* хребта та ендопротезів; дослідження зразків *ендопротезів* методом скінченних елементів та методом голографічної інтерферометрії та розробка *схем хірургічних операцій* з ендопротезування за допомогою розробленої комп'ютерної системи та дослідження результатів у клінічних умовах.

Схема взаємодії етапів досліджень – на рис. 1. Досліджувана біомеханічна система має принципово відмінні складові: біологічні та механічні. Принципові

відмінності складових – на рис. 2. Таким чином, необхідно створити *єдиний метод моделювання* 2-х принципово різних елементів біомеханічної системи: біологічних та механічних.

Для вирішення цієї проблеми пропонується *оригінальний авторський метод* узагальненого параметричного опису складних механічних систем (МУПОСМС). Його суть: досліджувана система S описується множиною параметрів $V = \{P_{Biol}, P_{Surg}, P_{Mech}, P_{Mod}\}$, де P_{Biol} – множина параметрів, що описують параметри *біологічного* об'єкта (у даному випадку – конкретного людського організму); P_{Mech} – множина параметрів, що описують параметри *механічних* складових біомеханічної системи (ендопротез); P_{Surg} – множина параметрів, що описують *схеми оперативних втручань*; P_{Mod} – множина параметрів математичної, геометричної та числової *моделей*, які використовуються для дослідження поведінки біомеханічної системи (наприклад, параметри скінченно-елементної моделі хребець – ендопротез). Взаємозв'язок параметрів – на рис.3.



Рис.1.

Принципові відмінності біологічних та механічних складових біомеханічної системи		
Фактори	Біологічні	Механічні
Форма	Задана природою; індивідуальна за параметрами, але топологічно однотипна	Шукано створюється; індивідуальні параметри визначаються при проектуванні; розбіжні об'єкти; топологія варіюється
Матеріал	Неоднорідний, анізотропний, непружосильний	Однорідний, ізотропний, пружосильний
Комп'ютерні геометричні та скінченно-елементні моделювання	Ускладнені із-за форми та властивостей матеріалу	Не виникає принципових проблем

Рис.2.



Рис. 3.

Задача, що ставиться, може бути формалізована наступним чином: знайти

$$P^* = \arg \min K(p), p \in \bar{P}, \quad (1)$$

де $\bar{P} = P_{Biol} \cap P_{Mech} \cap P_{Mod} \cap P_{Surg}$.

Таким чином, для визначення шуканих параметрів ендопротезів необхідно: описати множину параметрів P_{Biol} ; описати множину параметрів P_{Mech} ; описати множину параметрів P_{Surg} ; описати множину параметрів P_{Mod} ; сформулювати критерій $K(p)$, що описує складність схеми оперативного лікування та післяопераційних ускладнень; вирішити задачу мінімізації (1) у просторі $\bar{P}$ та отримати оптимальні значення параметрів ендопротезу.

В результаті отримаємо параметричний опис системи $S = S(P^*)$, де S – опис системи за допомогою деяких формальних правил. Під параметрами P розуміємо і конструктивні розміри, і геометрію, і конструкцію ендопротеза, і тип скінченно-елементної моделі і таке інше. Таким чином, узагальнені параметри P – не тільки кількісні величини, але і якісні фактори. Запропонований метод дає можливість створювати математичні, геометричні, числові моделі досліджуваних об'єктів з формальним використанням традиційного параметричного опису.

Програмна реалізація. На основі запропонованого авторами математичного забезпечення створюються алгоритми та програмне забезпечення. Схема функціонування системи наведена на рис. 4.



Рис. 4.

Таким чином, створюється *принципово новий підхід*. Він названий *узагальненим параметричним підходом*. Даний метод дає можливість вирішити 2 принципово різні задачі [4-10]: опис множини об'єктів; опис індивідуальних особливостей конкретного пацієнта (рис. 5). На рис. 6 наведена схема розробки операцій ендопротезування. На рис. 7 – ілюстрації деяких етапів досліджень елементів біомеханічних систем, зокрема, ендопротезів.

Запропонована технологія має *пряме практичне* впровадження. Після його виконання різко підвищиться *якість та ефективність* операцій ендопротезування у хірургічних клініках. При цьому зменшаться кошти та терміни для оперативного лікування. Крім того, з'явиться індивідуальна електронна база даних про протікання операції та реабілітації пацієнта. Ці індивідуальні бази складаються у загальну базу даних пацієнтів, травм та патологій ендопротезів. На базі цієї БД може бути побудована база знань в області ендопротезування елементів опорно-рухового апарату.



Рис. 5.



Рис.6.

Висновки. Принципово *нове та унікальне* у запропонованій технології:

1. Узагальнений авторський метод (*узагальнений параметричний опис елементів біомеханічних систем*) дає можливість створення математичних, геометричних, числових моделей елементів будь-якого типу.
2. Елементи біомеханічних систем розглядаються з урахуванням контактної взаємодії у рамках *єдиної системи*.
3. Запропонований МУПОСМС дає можливість створення *баз даних*: пацієнтів; травм (патологій); ендопротезів; схем оперативного лікування; наслідків операцій ендопротезування.

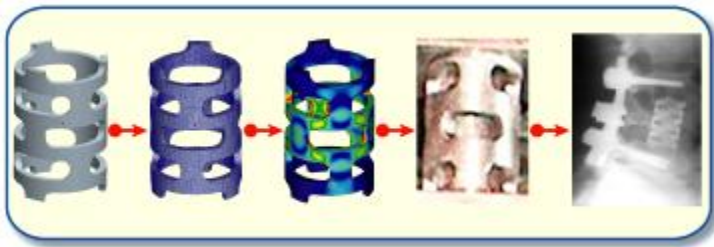


Рис. 7.

4. Комп'ютерна система дає можливість комп'ютерного моделювання форми, напружено-деформованого стану елементів біомеханічних систем з урахуванням **індивідуальних** особливостей пацієнтів.

5. На основі запропонованого підходу можлива комп'ютерна розробка нових схем хірургічних операцій для **ендопротезування** та **нових типів** ендопротезів.

6. Розрахунково – експериментальні дослідження методом скінченних елементів та методом голографічної інтерферометрії дають принципову можливість отримання **достовірних** моделей та вдалих **конструкцій** ендопротезів.

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. *J. Kenneth Burkus, M.D.* Update: Spinal Implant Breakthrough Stabilizes Spine, http://www.spineuniverse.com/displayarticle.php?_article1360.html. 3. *Steffen T., Tsantrizos A. et al.* Cages: design and concepts // *Euro Spine*. –2000. –Vol.9(7). –p.5089-5094. 4. *Korzh N., Filipenko V., Ostrovskaya Ye., Yukhno T., Lytvynov L., Sevidova Ye., Timchenko I., Golukhova A., Pokhyl Yu.* Tribological study of single crystal friction pair for joint endoprosthesis // *Вісник ортопедії, травматології та протезування*. – 2003. – №3. – С.34-37. 5. *Filipenko V., Zuman Z., Glushko V., Radchenko V., Mezentsev V.* Nonstoichiometric hydroxyapatite granules for orthopaedic applications // *Journal of materials science: materials medicine* 15(2004) 551-558. 6. *Radchenko V., Zyman Z., Filipenko V., Glushko V., Mezentsev V.* Nonstoichiometric hydroxyapatite granules for orthopaedic applications // *Ортопедия, травматология и протезирование*. – 2003. – №1. – С.101-107. 7. *Ткачук Н.А.* Комплексное экспериментальное определение параметров численных моделей элементов механических систем // *Механіка та машинобудування*. – 2001. – №1,2. – С.65-69. 8. *Веретельник Ю.В.* Моделирование свойств материалов биомеханических систем: модели, подходы, численный эксперимент // *Вісник Національного технічного університету “ХПІ”*. Тематичний випуск: “Динаміка і міцність машин”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005. – № 47. – С.29-35. 9. *Ткачук М.А., Радченко В.О., Веретельник Ю.В.* Узагальнений параметричний опис складних біомеханічних систем // *Вісник Національного технічного університету “ХПІ”*. Тематичний випуск: “Динаміка і міцність машин”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005. – № 47. – С.173-180. 10. *Веретельник Ю.В.* Расчетно-экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния титановых эндопротезов // *Вестник НТУ “ХПИ”*. Тематический выпуск “Машиноведение и САПР”. –Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2005. – Вып. 53. – С.40-54.

Поступила в редколлегию 11.01.2006