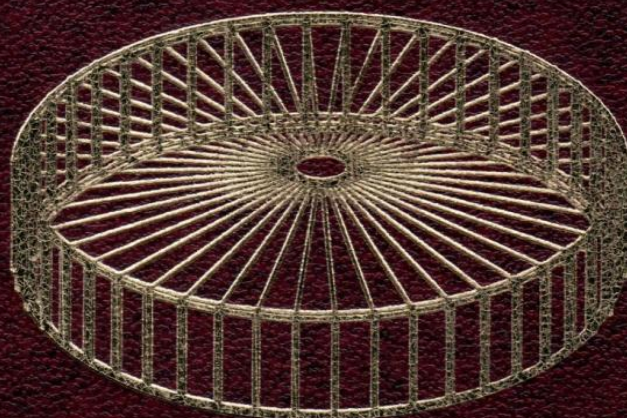


А.В. Шимановский,
В.К. Цыхановский, С.М. Талах

ОПТИМИЗАЦИЯ
КОМБИНИРОВАННЫХ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СИСТЕМ



Киев
Издательство «Сталь»
2012

УДК 624.074.042
ББК 38.5-02

Ш 61

Ш 61 **Шимановский А.В., Цыхановский В.К., Талах С.М.**

Оптимизация комбинированных пространственных систем /
Под общей редакцией Шимановского А.В. – К.: Изд-во «Сталь», 2012. –
462 с., рис. 181, табл. 71.

В книге изложены методология оптимального проектирования комбинированных пространственных конструкций, построение и реализация математических моделей оптимизации, специальные алгоритмы решения задачи на основе комбинации методов дискретизации, математического программирования, моделирования всех уровней проектирования от топологии конструирования, глобальной редукции и идеализации свойств материалов до комбинации схем нагружения, а также эффективные специальные алгоритмы оптимизации.

Приведены уточненные результаты исследований реальных большепролетных пространственных конструкций, трубчатых и сильфонных компенсаторов и различных комбинированных механических систем с учетом геометрической и физической нелинейности, а также потери местной устойчивости тонколистовых оболочечных элементов.

Для научных работников, инженеров, преподавателей, аспирантов, магистров и студентов технических вузов.

ISBN 978-617-676-005-4

УДК 624.074.042
ББК 38.5-02

Ш 61 **Шимановський О.В., Цихановський В.К., Талах С.М.**

Оптимізація комбінованих просторових систем / За загальною редакцією
Шимановського О.В. – К.: Вид-во «Сталь», 2012. – 462 с., рис. 181, табл. 71.

У книзі викладено методологію оптимального проектування комбінованих просторових конструкцій, побудова та реалізація математичних моделей оптимізації, спеціальні алгоритми розв'язання задачі на основі комбінації методів дискретизації, математичного програмування, моделювання всіх рівнів проектування від топології конструювання, глобальної редукції та ідеалізації властивостей матеріалів до комбінації схем навантаження, а також ефективні спеціальні алгоритми оптимізації.

Наведені уточнені результати досліджень реальних багатопрогнових просторових конструкцій, трубчастих та сильфонних компенсаторів та різних комбінованих механічних систем з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності, а також втрати місцевої стійкості тонколистових оболонкових елементів.

Для науковців, інженерів, викладачів, аспірантів, магістрів і студентів технічних вузів.

Рецензенти: В.Т. Гринченко, академик Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор
Л.М. Лобанов, академик Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор
В.Т. Трощенко, академик Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор

Рекомендовано к изданию Научно-техническими советами: Министерства регионального развития, строительства и жилищно-коммунального хозяйства Украины, Украинской государственной корпорации «Укрмонтажспецстрой», Института электросварки имени Е.О. Патона Национальной академии наук Украины, ООО «Украинский институт стальных конструкций имени В.Н. Шимановского».

© А.В. Шимановский,
В.К. Цыхановский, С.М. Талах, 2012
© Издательство «Сталь», 2012

ISBN 978-617-676-005-4

ВВЕДЕНИЕ

В строительной практике наряду с традиционными большепролетными железобетонными пространственными конструкциями находят все более широкое применение облегченные комбинированные пространственные системы, в том числе висячие тонколистовые, вантовые, тонкие железобетонные с внешним листовым армированием, стеклоцементные, тканевые и стеклопластиковые тентовые, а также мягкие пневмонапряженные тканевые и композитные оболочки. Эти конструкции широко используются в космической технике, авиа- и судостроении, в различных транспортных средствах и амортизирующих устройствах, дирижаблестроении, а также в гражданских зрелищных и выставочных зданиях, уникальных сооружениях различного назначения, а также в промышленных зданиях и сооружениях.

Комбинированные пространственные системы отличаются особенными, только им присущими свойствами, а именно:

- обладают значительной кинематической подвижностью (большими перемещениями отдельных фрагментов как единого целого) даже при малых внешних воздействиях;

- при использовании комбинированных мембранно-вантовых и мягко-оболочечных фрагментов наблюдаются умеренные и большие упругие и упруго-пластические деформации;

- в тонколистовых, композитных и тканевых фрагментах имеет место потеря местной устойчивости оболочки, обусловленная нерациональной формой поверхности оболочки;

- форма срединной поверхности большепролетных оболочечных комбинированных систем тесно взаимосвязана с напряженно-деформированным состоянием элементов подконструкций общей конструктивной системы.

Комбинированные пространственные системы, основным элементом которых являются гибкие оболочки, относятся к классу пространственных

тонкостенных конструкций таких, например, как тонкостенные резервуары большой и сверхбольшой вместимости объемом в сто и более тысяч кубических метров, газгольдеры, зернохранилища и силосы, большепролетные купольные и висячие покрытия зданий и сооружений, а также специальные упругие оболочечные приспособления – сильфоны, компенсаторы и тонкостенные криволинейные трубы.

При проектировании тонкостенных конструкций используются результаты теоретических и численных исследований на основе теории упругости и пластичности, в общем случае нелинейной. Однако разобщенность и ограниченность распространения результатов, методических сведений и рекомендаций затрудняет их практическое использование непосредственно конструкторами-проектировщиками. Кроме того, большинство разработанных методик и программных комплексов позволяют определить лишь несущую способность конструкций, что не в полной мере удовлетворяет инженера-проектировщика, основная задача которого сводится к определению параметров рациональной и оптимальной конструкции при заданных внешних воздействиях.

Создание работоспособной теории оптимального проектирования комбинированных пространственных систем является в настоящее время одной из актуальных задач строительной механики. Эта задача тесно связана не только с построением и реализацией математических моделей оптимизации, созданием специальных алгоритмов на основе комбинации методов дискретизации, математического программирования, моделирования на всех уровнях от топологии конструирования, глобальной редукции, идеализации свойств материалов, комбинации нагружения, но и с созданием эффективных специальных алгоритмов оптимизации, начиная от геометрического моделирования и поиска рациональных форм, анализа чувствительности отдельных конструктивных и стабилизирующих элементов, моделирования конструктивных элементов каркаса и поиска эквивалентных аналогов комбинированных конструктивных сечений и заканчивая определением начального спектра обобщенных параметров проектирования комбинированной системы, а также пределов их варьирования [69, 75, 76, 99, 142].

Оптимальное проектирование облегченных комбинированных пространственных систем только косвенно связано с наиболее разработанной в настоящее время методикой весовой оптимизации и предусматривает в основном оптимизацию их формы и структуры при введении вставок, ребер, стабилизирующих и других конструктивных элементов. В такой задаче оптимизации в качестве основного критерия качества – целевой функции – принимается не минимизация массы, а минимизация функции главных напряжений. Последнее связано с целым рядом проблем, а именно с:

- поиском адекватной дискретной модели для используемого численного метода;
- предварительным решением задачи о минимальной поверхности для выбранного в первом приближении контура;

– учетом ограничений, необходимых для получения реалистического проекта рассматриваемого класса механических систем в условиях учета предельного состояния в отдельных конструктивных элементах;

– выбором и сочетанием эффективных алгоритмов, а также их модификаций из множества известных в теории нелинейного программирования с учетом анализа чувствительности проекта и других стандартных процедур.

Успех решения поставленной задачи оптимизации облегченных комбинированных пространственных конструкций является реальным в связи с наличием быстродействующих персональных компьютеров. Такая вычислительная техника обеспечивает необходимые условия не только для разработчиков сложнейших проблемно-вычислительных комплексов и автоматизированных систем научных исследований (АСНИ), но также для пользователей всех уровней, которые могут на основе созданных АСНИ и отдельных программных комплексов проводить исследования комбинированных пространственных систем и изучать поведение входящих в их состав отдельных подконструкций.

В общем случае задача оптимального проектирования формы оболочечной конструкции сводится к выбору геометрических параметров проектирования, удовлетворяющих различным критериям оптимальности: минимизации срединной поверхности при заданной конфигурации контура и подоболочечного объема конструкции, а также обеспечению условий создания силовых поверхностей (аналогов безмоментных оболочек) и др. Однако поскольку подобные задачи не имеют общей математической формализации, то их можно отнести к неявной весовой оптимизации или классу обратных задач теории оболочек [3, 69, 75, 99, 142].

Для обратных задач теории оболочек математическая модель включает задание векторов параметров проектирования, внешних воздействий и ограничений в виде равенств и неравенств. При решении этих задач необходимо определять параметры проектирования для оптимальной формы и структуры расчетной схемы оболочки, которая удовлетворяет заданным нагрузкам и ограничениям. Следует заметить, что при решении обратных задач можно не формулировать функцию цели в явном виде, так как ее можно заменить ограничениями в виде равенств, которые содержат в качестве неизвестных параметры состояния и проектирования. Для решения подобных задач на основе методов нелинейного программирования необходимо предварительное представление их области решения в пространстве состояния с использованием анализа чувствительности. Такой подход вызывает существенные математические трудности, поэтому более целесообразным является использование специальных алгоритмов геометрического моделирования, в том числе управление формой, когда она существенно влияет на функцию соответствующего критерия качества для конкретной задачи [75, 76].

На основе геометрического и структурного моделирования достигается глобальная редукция параметров проектирования дискретной формы оболочечной конструкции (оболочки и опорного каркаса), а задача оптимизации

сводится к ограниченному числу (до 10–15) обобщенных параметров проектирования и состояния.

Для построения математической модели задачи оптимизации облегченных пространственных конструкций в общем случае наиболее эффективным и в определенной степени единственно возможным численным методом является метод конечных элементов (МКЭ). Одной из наиболее трудных проблем создания математической модели задачи на основе МКЭ является разработка специальных алгоритмов оптимизации для сведения задачи оптимального проектирования (ОП) относительно переменных проектирования к задаче нелинейного программирования относительно переменных состояния (НЛП) [9, 11, 99, 134, 135].

Изложенная проблемная задача связана с решением также самостоятельной задачи анализа чувствительности проекта исследуемой конструкции для установления связи переменных проектирования и переменных состояния. Методы анализа чувствительности проекта могут входить в качестве существенной части в комплексный алгоритм, например, с методом обобщенного приведенного градиента нелинейного программирования, а также использоваться в диалоговом проектировании с помощью персонального компьютера.

Проблема разработки эффективных алгоритмов оптимизации пространственных тонкостенных конструкций тесно связана с проблемой построения алгоритмов решения систем сильнонелинейных уравнений равновесия и ограничений, входящих в математическую модель задачи оптимизации. В ранее выполненных исследованиях были разработаны и реализованы эффективные алгоритмы решения систем сильнонелинейных уравнений с различными нелинейными ограничениями, связанными с односторонними связями, потерей местной устойчивости и развитием упруго-пластических деформаций [5, 140, 141, 147]. Поэтому целесообразно ранее полученные результаты научно-исследовательских работ по нелинейному деформированию тонкостенных пространственных конструкций использовать на более высоком уровне создания специальных алгоритмов по оптимизации комбинированных оболочечных систем.

Для оптимизации формы гибких и мягких оболочек с использованием редуцированного вектора независимых параметров проектирования реализованы прямые методы поиска – метод золотого сечения, сопряженных направлений, Коши и др. Предложенные методы являются весьма эффективными и надежными, а в ряде случаев единственно возможными.

В связи с тем, что гибкие пространственные оболочечные системы (в том числе мембранно-вантовые) на стадии процесса формообразования отличаются сильной геометрической нелинейностью и плохо обусловленными матрицами систем линеаризованных разрешающих уравнений, наиболее эффективными алгоритмами их оптимального проектирования являются комбинированные алгоритмы последовательной оптимизации, сочетающие прямые хорошо разработанные методы на ранней стадии оптимизации формы и

непрямые градиентные методы, модифицированные методы Ньютона, анализа чувствительности и др. на более поздних стадиях оптимального проектирования облегченных оболочечных конструкций [37, 38, 47, 48, 135, 136].

В основном, в самом общем случае, рассматривается проект многопролетного покрытия, включающего набор отдельных большепролетных висячих тонколистовых оболочек на упруго-податливых контурах [65]. Каждая висячая оболочка из этого набора относится к классу сильнонелинейных конструкций, характер работы и формоизменения которых пока недостаточно изучен. В монографиях и специальной литературе описаны методы расчета и конструирования, которые в той или иной степени носят частный характер [65]. Вместе с тем сильнонелинейные конструкции, в отличие от традиционных систем, имеют ряд неоспоримых преимуществ. Так, благодаря максимально эффективному использованию несущей способности материалов эти конструкции позволяют перекрывать весьма значительные пролеты без промежуточных опорных элементов, создавать легкие, экономичные и выразительные в архитектурном плане сооружения. Одним из важных преимуществ таких механических систем является также их малая чувствительность к сейсмическим нагрузкам, различного рода перегрузкам, осадкам и смещениям опор и пр.

Ограниченное применение подобных механических систем связано с недостаточной изученностью их работы при наличии существенной кинематической подвижности и формоизменения. Особенность поведения, например, висячих тонколистовых систем при внешнем воздействии проявляется в наличии больших перемещений, превышающих толщину оболочки на порядок (и более) и потере местной устойчивости тонколистовой оболочки (образование локальных складчатых зон). Указанные особенности вызывают необходимость моделирования процесса формоизменения оболочки при нагружении и определения ее начальной оптимальной формы и структуры стабилизирующих элементов каркаса конструкции, максимально исключающих развитие локальных складчатых зон.

Исходя из изложенного, постановка задачи исследования сильнонелинейных конструкций включает учет геометрической (больших перемещений) и физической нелинейности (описание модели одноосного напряженного состояния в локальных условно складчатых зонах). Таким образом, рациональное проектирование многопролетного висячего покрытия, состоящего из комбинации отдельных висячих большепролетных тонколистовых оболочек при наличии стабилизирующих элементов, состоит в оптимизации формы самой отдельно взятой висячей оболочки и структуры элементов каркаса опорных внутренних и наружных контуров, с учетом числа опорных колонн или их комбинаций, криволинейных ребер под световые фонари, вставок, полостей, вутов, шпренгельных стабилизирующих элементов, распорок и других конструктивных элементов.

Определение наилучшего конструктивного решения комбинированной механической системы чрезвычайно сложный процесс, состоящий из работ

по обеспечению наилучших эксплуатационных условий нагружения, выбора рациональных компоновочно-силовых схем (КСС), форм деталей и узлов, эффективных материалов, способствующих получению минимальной массы конструкций с учетом технологичности и стоимости [60]. Всем этим требованиям в равной степени одновременно удовлетворить нельзя, например, для летательных аппаратов основным критерием качества является обеспечение минимальной массы. Кроме того принципиальная трудность, не позволяющая решить поставленную задачу оптимизации разрабатываемого проекта, состоит в том, что определение оптимальных параметров конструкции возможно лишь для заданной КСС, однако остается нерешенным вопрос об оптимальности самой компоновочно-силовой схемы [60].

Практика, требования нормативных стандартов и возможность использования новых композитных материалов, а также технологий изготовления, монтажа и возведения пространственных тонкостенных конструкций позволяют рассмотреть две-три КСС благодаря инженерной изобретательности, широте эрудиции, интуиции, опирающимся на опыт и понимание проектантами условий функционирования создаваемого (проектируемого) объекта. После этого достаточно оптимизировать каждую из назначенных КСС по определению оптимальных параметров и сделать выбор наиболее рационального проекта пространственной тонкостенной конструкции.

В соответствии со сказанным в данной книге ставятся две основные задачи. Во-первых, для разработки вариантов КСС даются некоторые сведения о наиболее рациональных путях решения проблемы, эффективных компоновочных решениях, критериях эффективности материалов, наиболее рациональных формах и структурах оболочек, стабилизирующих конструктивных элементах на основе известных в литературе и в ранее изданных авторами статьях и монографиях примеров эффективных пространственных конструкций. Во-вторых, для заданной силовой схемы проекта предлагается методика и алгоритмы оптимального проектирования комбинированной оболочечной конструкции с определением оптимальных переменных проектирования и состояния, с представлением оценок эффективности различных конструктивных элементов.

При написании книги использованы результаты обобщения опыта многолетних исследований комбинированных пространственных систем, выполненных в Украинском институте стальных конструкций имени В.Н. Шимановского.

Авторы надеются, что данная книга заинтересует специалистов и будет полезна всем, кто причастен к созданию (расчету, конструированию, проектированию) разнообразных комбинированных пространственных систем. В книге с единых методологических позиций изложен теоретический и практический материал, представлены все использованные соотношения нелинейной теории упругости и пластичности, а также описаны различные алгоритмы решения больших систем нелинейных уравнений, к которым сводятся рассматриваемые в данном издании задачи деформирования и оптимизации

комбинированных пространственных систем. Книга снабжена не только тестовыми примерами, позволяющими вникнуть в детали алгоритмов, но и реальными задачами, содержащими дальнейшее развитие идей, лишь слегка затронутых в тексте. Все это делает книгу доступной для самостоятельного изучения студентами, бакалаврами, магистрами, аспирантами, научными работниками, инженерами и всеми, кому представленные задачи интересны с практической точки зрения.

Улучшению содержания рукописи в значительной мере способствовали замечания и советы рецензентов – академика Национальной академии наук Украины, доктора технических наук, профессора В.Т. Гринченко, академика Национальной академии наук Украины, доктора технических наук, профессора Л.М. Лобанова и академика Национальной академии наук Украины, доктора технических наук, профессора В.Т. Трощенко, большая часть которых была учтена при подготовке окончательного варианта рукописи. Им авторы выражают свою искреннюю признательность.

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1 Теория нелинейного деформирования и формоизменения комбинированных пространственных систем	10
1.1. Лагранжевая формулировка теории в приращениях.....	10
1.2. Уравнения движения сплошных сред на основе вариационных принципов.....	21
1.3. Уравнения теории течения при конечных упруго-пластических деформациях.....	25
1.4. Модели упругопластических сплошных сред и их модификации.....	31
1.5. Модели работы материала конструктивно-ортотропных тонких оболочек.....	36
1.6. Специальные алгоритмы решения систем нелинейных уравнений равновесия с учетом потери местной устойчивости.....	40
1.7. Выводы.....	48
Глава 2 Модели решения задач оптимизации с использованием метода конечных элементов	52
2.1. Геометрические и топологические характеристики универсального оболочечного конечного элемента	52
2.2. Представление тензорных рядов функций напряжений и деформаций в области конечного элемента	59
2.3. Обобщенные перемещения, нелинейная матрица реакций и согласованные матрицы масс, обобщенных инерционных и внешних сил оболочечного конечного элемента ...	62
2.4. Постановка задачи оптимального проектирования тонкостенных систем	68
2.5. Модель оптимизационной задачи как обратной задачи строительной механики.....	72

2.6. Матрицы чувствительности и функций ограничений по прочности проектируемой оболочечной системы.....	75
2.7. Специальный алгоритм решения обратной задачи с нелинейными ограничениями в пространстве состояний на основе непрямого метода.....	80
2.8. Выводы.....	82
Глава 3 Тестовые и контрольные задачи для некоторых механических систем	83
3.1. Прямоугольная пластинка с центральным вырезом	84
3.2. Короткая консольная балка как континуальная система...	87
3.3. Полоса, ослабленная круговыми вырезами	90
3.4. Алюминиевая пластинка с отверстием.....	93
3.5. Задачи Кармана и Бразье об изгибе цилиндрической оболочки (трубы).....	98
3.6. Сильфонная манометрическая трубка	106
3.7. Круглый сильфонный компенсатор	121
3.8. Выводы	134
Глава 4 Оптимальное проектирование комбинированного висячего покрытия	136
4.1. Основные конструктивные параметры зданий с висячими покрытиями	136
4.2. Основные виды висячих покрытий	137
4.3. Постановка задачи оптимального проектирования и прочностного расчета	145
4.4. Дискретный точечный каркас поверхности двойкой гауссовой кривизны	148
4.5. Веерные пучки плоскостей в трехмерном евклидовом пространстве	152

4.6.	Плоские пространственные кривые на поверхности двойкой гауссовой кривизны	157
4.7.	Рекуррентные уравнения точечного каркаса поверхности .	158
4.8.	Топологическая и расчетная схема покрытия, моделирование внешних воздействий	163
4.9.	Особенности алгоритмов оптимизации формы и структуры покрытия	167
4.10.	Исследование напряженно-деформированного состояния покрытия	170
4.11.	Выводы.....	177
Глава 5	Определение рациональной начальной формы нити конечной жесткости	178
5.1.	Решение обратной задачи нити конечной жесткости	178
5.2.	Рациональная начальная форма нити конечной жесткости	182
5.3.	Особенности определения рациональной начальной формы нити конечной жесткости с постоянным распором	188
5.4.	Анализ рациональных начальных форм нити конечной жесткости	191
5.5.	Прочностной расчет большепролетного комбинированного вантового покрытия.....	197
5.5.1.	Общая характеристика сооружения	197
5.5.2.	Построение дискретной модели и расчетной схемы	198
5.5.3.	Результаты численных исследований.....	206
5.6.	Выводы.....	217
Глава 6	Оптимизация формы и структуры конструкций компенсаторов трубопроводных систем	219
6.1.	Конструктивные решения трубопроводных систем	219
6.2.	Переходы трубопроводов через естественные и искусственные препятствия	220

6.3.	Оптимизационная модель сильфонного многолинзового компенсатора	222
6.4.	Прямой поисковый метод решения оптимизационной задачи пространственной оболочечной конструкции	227
6.5.	Особенности алгоритма оптимизации формы и структуры трубчатого компенсатора.....	234
6.6.	Анализ работы сильфонных многолинзовых компенсаторов.....	247
6.7.	Анализ решения оптимизационной задачи сильфонного многолинзового компенсатора.....	260
6.8.	Выводы.....	285
Глава 7	Оптимальное проектирование конструкций комбинированных большепролетных покрытий	286
7.1.	Комбинированные конструкции большепролетных покрытий гражданских и промышленных зданий и сооружений	286
7.2.	Основные виды конструкций большепролетных покрытий и их особенности	290
7.3.	Постановка задачи нелинейного деформирования и прочностного расчета	293
7.4.	Геометрическая и топологическая схемы поверхности расчетных фрагментов	306
7.5.	Геометрическая и структурная схемы элементов каркаса расчетных фрагментов.....	312
7.6.	Анализ напряженно-деформированного состояния комбинированного большепролетного покрытия.....	317
7.7.	Особенности оптимизации формы и структуры комбинированного большепролетного покрытия сложной конфигурации.....	325
7.8.	Сравнительный анализ результатов расчета комбинированных большепролетных покрытий.....	329
7.9.	Выводы.....	340

Глава 8	Большепролетные конструктивно-ортотропные оболочки цилиндрической формы на упруго-податливом контуре.....	342
8.1.	Геометрическое моделирование поверхности и топологическая схема гиперболического параболоида с ромбовидной формой в плане	342
8.2.	Исследование сходимости расчета конструктивно-ортотропных тонких оболочек	350
8.3.	Анализ напряженного состояния основных элементов каркаса покрытия	361
8.4.	Исследование сходимости реальных и модельных конструкций конструктивно-ортотропных тонких оболочек	370
8.5.	Исследование напряженно-деформированного состояния оптимальных вариантов большепролетных оболочечных систем сложной конфигурации	384
8.6.	Выводы	397
Глава 9	Оптимизация формы и структуры вертикального цилиндрического резервуара большой емкости.....	398
9.1.	Существующие конструкции вертикальных цилиндрических резервуаров	398
9.2.	Основные типы конструкций вертикальных цилиндрических резервуаров.....	401
9.3.	Постановка задачи расчета вертикального цилиндрического резервуара	404
9.4.	Внешние воздействия и нагрузки	415
9.5.	Оптимальное проектирование конструкции резервуара.....	426
9.6.	Прочностный расчет конструктивных элементов каркаса резервуара.....	444
9.7.	Выводы.....	446
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	448

