

## Расчет строительных конструкций

### МЕХАНИКА: ПРОБЛЕМА – ИДЕЯ – ПРАКТИКА

Н.М. ЯКУПОВ, д-р техн. наук, профессор  
Учреждение Российской академии наук Институт механики и машиностроения  
Казанского научного центра РАН, Казань, Лобачевского, 2/31.

*Диалектику познания и развития можно проследить, прослеживая цепочку решения той или иной задачи: «проблема – идея – практика». Именно такой естественной и диалектической цепочки пытался придерживаться автор.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** рычаг, колесо, оболочка, пленка, мембрана, градирия.

С появлением человека на Земле возникли и первые проблемы: как укрыться от дождя и холода, как защититься от зверей и враждебно настроенных соседей, как перейти через речки и овраги, как поднять и перенести тяжесть и т.д. Со временем наши предки, используя природные аналоги, находили решение этих проблем. Возникли первые идеи возведения навесов и укрытий, первые идеи сооружения переходов и мостов; первые идеи применения рычагов и воротов. До формирования современной науки механики и материаловедения еще пройдут тысячелетия. Однако фундамент механики закладывался в то далекое время. Решая проблемы сооружения строительных объектов, проблемы перемещения и подъема многотонных грузов, проблемы обработки материалов и проблемы создания машин и механизмов, шаг за шагом механика крепла и росла. Были сделаны открытия, которые не раз изменяли существующие представления, появлялись идеи и открытия, которые буквально переворачивали мир. Нередко, говоря о важнейших научных открытиях, способствующих переустройству мира, отмечают достижения в области математики, физики, астрономии, химии, науке о земле и биологии. Так это, в частности, сделано в книге «Научные открытия, перевернувшие мир. Как это было» [1]. Несомненно, вклад этих наук в общечеловеческом развитии огромен. К сожалению, Джон Гриббин [1] необоснованно забывает изобретения механиков, которые не только когда-то «перевернули мир», но и продолжают оставаться основой современных механизмов и машин, сооружений и конструкций. Это и изобретение рычага, позволившего поднимать относительно большие тяжести и ставшего основой современных рычажных механизмов. Это и применение наклонной плоскости, ворота, а несколько позже блоков на базе колеса, позволивших поднимать каменные глыбы. Это и изобретение колеса, одного из величайших открытий в истории человечества, позволившего перейти от саней к современному автомобилю и современным механизмам. Это и рождение криволинейных форм строительных элементов, приведших к развитию элементов строительных конструкций «от каменных глыб к тонкостенным элементам»; это и изобретение бетона и железобетона, заложивших основу современному строительному делу и т.д. Механики веками накапливали опыт, изобретали новые подходы и способы и, несомненно, внесли огромный вклад в развитие всего человеческого общества.

#### **О первых изобретениях механиков**

Решая проблемы, возникающие перед древним человеком, копируя окружающую его флору и фауну, а также природные сооружения, он начал изобретать и использовать орудия труда, строить жилища. Первые изобретения человека были сделаны тысячелетия назад. Конечно, сегодня невозможно установить авторов этих изобретений и открытий, но их изобретения и открытия буквально «переворачивали мир».

**О рычаге.** Древний человек уже в начале своего активного пути столкнулся с проблемой подъема больших тяжестей. Подложив один конец длинной палки под камень, оперев ее на полено (опору), и прикладывая силу на другой конец палки, можно было приподнять и переместить камень в другое место. Так родилась *идея* рычага. Первые упоминания о рычаге уходят вглубь тысячелетий. Древние люди уже в далеком прошлом научились поднимать большие тяжести. Одним из первых инструментов была обычная палка, которую первобытный человек превратил в рычаг для поднятия тяжести. Древние люди интуитивно осознали, что рычаг – это сила! Всем нам известны знаменитые слова Древнегреческого ученого Архимеда по поводу рычага: «Дайте мне

только точку опоры, и я переверну Землю». Не зная законов механики, древние люди начали интуитивно применять обычные рычаги. Кто и когда изобрел рычаг? На эти вопросы практически невозможно ответить. Несмотря на то, что палки в качестве простого рычага используют и некоторые животные, например, шимпанзе, применение рычага было шагом установления человеком превосходства над животными – крупным шагом человека по пути его развития. Многие инструменты: плоскогубцы, тиски, ножницы и некоторые другие представляют собой рычаги специального назначения.

**Из истории рождения колеса.** Еще в древние времена человек научился перевозить товары и материалы верхом на животных. Несколько позже в Бронзовой эпохе различные грузы уже транспортировались на санях, волокушах... Возникли проблемы по транспортировке тяжелых грузов, в частности, многотонных каменных блоков при строительстве различных сооружений. Нужны были новые подходы.

Веками, наблюдая за животными, которые, сворачиваясь в круглый клубок, ловко скатывались с вершины гор, или, наблюдая за тем, как легко перемещалось круглое дерево по грунту, люди пришли к мысли о переходе от волочения к качению. Родилась *идея* колеса. Предшественником колеса можно считать известный до этого деревянный каток, который подкладывался под перемещаемый груз. Упоминания о колесе встречались уже в Бронзовой эпохе. В Месопотамии в IV тысячелетии до нашей эры широко использовался деревянный каток, который подкладывался под перемещаемый груз. Первоначально колесо представляло собой деревянный диск. Сплошные колеса жестко крепились с осью и вертелись совместно с ней.

В 2700 году до нашей эры появляются наскальные рисунки повозок. Одна из древних повозок найдена при раскопках в Мохенджо-Даро. Такие повозки были незаменимы при передвижении по ровной прямой дороге, но были неповоротливыми. Возникла *проблема*: на поворотах тяжело нагруженные повозки легко ломались или переворачивались. *Идея* по совершенствованию колеса нашлась относительно быстро. Было принято решение независимого крепления колес. Возникла *идея* колеса со ступицей, насаживающегося на неподвижную ось. Это было крупным шагом вперед в развитии техники передвижения. Такая схема крепления колес быстро нашла практическую реализацию.

Другая *проблема* возникла с весом колеса. Колеса делали из цельного куска дерева. Поэтому повозки были тяжелыми и передвигались очень медленно. Вначале была *идея*: для уменьшения веса колеса выдалбливать в нем вырезы, а для восстановления жесткости укреплять поперечными скрепами. Очевидно, в эпоху Каменного века, ничего лучшего и нельзя было придумать. Но после возникла *идея* со спицами. Уже во II тысячелетии до нашей эры в Малой Азии *идея* нашла практическую реализацию: появляются колеса со спицами, ступицей и ободом. Колеса стали изготавливать со спицами из дерева, а несколько позже из металла. Такие колеса использовались вначале только в колесницах для перевозки людей, но позднее их стали применять и в тележках для перевозки грузов. Позднее, в I тысячелетии до нашей эры, стали применять металлический обод, что позволяло увеличить прочность и долговечность колеса. Такое колесо могло вращаться относительно быстро и не боялось ударов о камни. Со временем в транспортных машинах металлический обод был заменен резиновыми шинами для амортизации.

Изобретение колеса оказало огромное влияние на развитие средств передвижения и транспортировки, способствовало развитию ремесленного дела, дало толчок к развитию науки и техники. Колесо начали использовать в гончарном деле, в водяных мельницах, в ирригационных сооружениях, в прядильных станках, а позднее в различных станках и механизмах. Изобретение колеса можно считать величайшим открытием в истории человечества.

**Из истории рождения строительных конструкций.** Неоценим вклад механиков в строительное дело [2,3]. Предки из далекой бронзовой эпохи оставили после себя композиции из массивных каменных блоков – менгиры, дольмены и кромлехи. Уже в те эпохи возникали множество вопросов, связанных с прочностью и устойчивостью этих на вид простых строительных сооружений. Возникли проблемы подъема многотонных элементов...

Наблюдая за различными природными конструкциями, постепенно возникла *идея* использования наряду с традиционными прямолинейными элементами криволинейные формы, которые позволяли перераспределять усилия в элементах конструкций, существ-

венно уменьшать области, подверженные растяжению, где обычно возникают трещины, и происходит разрушение конструкций. Появились одиночные полукруглые арки в Элладе и в Древнем Риме. Для более широкого распространения новых криволинейных структур не хватало вещества, которое могло бы прочно соединить отдельные кирпичики. То есть возникла *проблема* создания связующего элемента. Десятилетиями происходил поиск нового связующего материала. В Древнем Риме возникла *идея* использования в качестве вяжущего вещества специальные измельченные горные породы – аналог современного цемента. При затвердевании водного раствора с цементом получался искусственный камень – бетон. Конечно, характеристики первого бетона существенно уступали характеристикам современного бетона, однако был сделан важный шаг вперед. Начиная с эпохи Древнего Рима, бетон стал важнейшим строительным материалом. Рождение бетона способствовало широкому распространению арочных структур при строительстве мостов и мостовых переходов, возведению различных зданий и сооружений. Применение арочных структур было началом использования пространственных искривленных конструкций в строительном деле, когда для обеспечения прочности «запрягли» форму поверхности. С развитием строительного дела уже в эпоху Эллады и Древнего Рима возникла *проблема* реализации больших каменных покрытий. Решению этой проблемы способствовало появление бетона и развитие арочных структур. Возникла *идея* получить полусферические купола путем вращения полукруглой арки вокруг вертикальной оси. Эта *идея* нашла практическую реализацию при строительстве Римского Пантеона (около 125 год нашей эры). Полусферическое покрытие Пантеона до XIX века было непревзойденным примером покрытия больших размеров. Диаметр покрытия составлял 43,3 метра.

Полусферические арки и покрытия относительно плохо работали при землетрясениях. Возникла *проблема* создания более прочных и живущих структур. Идею решения проблемы нашли в эпоху расцвета Исламской архитектуры. Возникла *идея* использовать сложные контуры и заостренный угол в вершине арки. Эта *идея* нашла практическую реализацию: возникли заостренные арочные структуры со сложным контуром и, несколько позже, покрытия сложной геометрии. Это же *идея* спустя века, была использована в Западной архитектуре – появились так называемые стрельчатые арки.

Каменные покрытия и перекрытия были чрезвычайно тяжелыми и громоздкими. Возникла *идея*: для уменьшения веса, снижения расхода материала и увеличения прочностных характеристик делать покрытия двух- и трехслойными оболочками. Так, начиная с XII века, в Исламской архитектуре появились первые двухслойные купола, между которыми размещали деревянные элементы связи. За счет этого прочность конструкций значительно повышалась, а вес снижался.

### **О некоторых разработках последних лет**

Механики изобретали и продолжают генерировать идеи, способствующие развитию науки и техники. Ниже приводятся резюме некоторых результатов исследований последних лет.

**Оболочки сложной геометрии.** Тонкостенные конструкции, обладая уникальными свойствами, находят широкое применение в строительстве, в машиностроении, энергетике. В связи с запросами практики в начале XX века были заложены основы теории пластин и оболочек, естественным и актуальным направлением развития которой стала нелинейная теория оболочек. В 1940-1960 годы под руководством профессора Х.М. Муштари была разработана нелинейная теория упругих оболочек [4, 5]. С 1960-х годов начался этап применения теории для решения практических задач [6]. Наряду с решением частных нелинейных задач, развивались методы расчета, например, в работах М.С. Корнишина и Ф.С. Исанбаевой [7,8]. Вначале рассматривались сферические, конические, цилиндрические оболочки, то есть тонкостенные конструкции канонической геометрии. Однако среди тонкостенных конструкций особенно эффективными по своим характеристикам являются оболочки сложной геометрии [2,3,9,10]. Известный испанский архитектор Эдуардо Торроха о значении формы конструкции для обеспечения необходимой жесткости и прочности отмечал: "Лучшим сооружением является то, надежность которого обеспечивается главным образом за счет его формы, а

не за счет прочности его материала". Возникла *проблема* расчета оболочек сложной геометрии.

*Панели со сложными контурами.* Для расчета панелей со сложными контурами разработан дифференциальный вариант метода конечных элементов [10,11], когда в одном направлении искомые перемещения задаются как в конечно-элементном подходе, а в другом – непрерывными.

*Пологие двусвязные гибкие оболочки.* Для расчета используется подход предварительной параметризации рассматриваемой области канонической областью в виде кольца. Искомые перемещения в окружном направлении разлагаются в ряды Фурье, а в радиальном направлении предполагаются непрерывными [10,12-15].

*Произвольные оболочки сложной геометрии. Идея:* свести задачу к канонической области, решая задачу предварительной параметризации рассматриваемого объекта, и применить численный метод решения задачи для рассматриваемой канонической области. Для расчета оболочек сложной геометрии разработан эффективный вариант метода конечных элементов, который основан на синтезе идей параметризации срединной поверхности  $\sigma$  рассматриваемой оболочки и метода конечных элементов. Описание метода для случая, когда решение представляется в виде интерполяционного эрмитового кубического сплайна двух переменных, некоторые решенные задачи, а также развитие метода применительно к трехмерным объектам, к оболочкам средней толщины и трехслойным оболочкам рассмотрены, в частности, в работах [9,10,16-40].

Применение параметризации и представление решения в каждом из прямоугольников в виде кубического сплайна обеспечивают непрерывность функции перемещений и их первых производных во всей рассматриваемой области. Таким образом, удалось получить согласованные (совместные) элементы на базе гипотезы Кирхгофа-Лява для оболочек сложной формы.

*Задача параметризации.* На этапе параметризации предполагается, что поверхность  $\sigma$ , в общем случае, не может быть описана известными аналитическими функциями, а радиус-вектор  $r$  задается его значениями в точках, координаты которых определены в принятой системе координат. Если информация о геометрии оболочки задается дискретно, то при вычислении производных от радиус-вектора  $r$  возникает *проблема* параметризации поверхности оболочки сложной геометрии: возникает необходимость задания такой аппроксимирующей функции, чтобы значения производных третьего порядка можно было бы найти с достаточной точностью. *Идея:* применить экспериментально-теоретический подход: на экспериментальном этапе, используя двумерную сетку из упругих нитей, построить по заданным контурам необходимую поверхность и измерить координаты узлов сетки; на теоретическом этапе, используя сплайновую аппроксимацию, построить по экспериментальным данным модель гладкой поверхности на ПЭВМ. Разработан экспериментальный способ параметризации поверхностей сложной геометрии [41,42]. Получен патент на изобретение № 2374697 [42].

*Формование оболочек сложной геометрии.* Технология формования оболочек сложной геометрии достаточно сложная задача. Можно использовать, например, литье и штамповку с использованием специальных форм. Возникла *проблема* формования оболочек сложной геометрии без специальных форм. *Идея:* использовать материалы со свойством «памяти» для формования сложных поверхностей. Были разработаны способы изготовления [43,44] архитектурно - выразительных высокопрочных оболочек, на которые получены патенты на изобретения №2255864, №2295446. Разработка включена в Отчетный доклад Президиума Российской академии наук: Научные достижения РАН в 2007 году. Высокий уровень разработки отмечен в 3-х Дипломах Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (ФИПС).

*Механические свойства пленок, мембран и покрытий.* Среди тонкостенных конструкций особо выделяются пленочные и мембранные конструкции. Если XX век по классификации этапов развития элементов конструкций был веком тонкостенных структур [3], то XXI век станет веком пленок, мембран и покрытий, которые используются для решения многих проблем [45,46]. Получают распространение очень тонкие структуры, включая нанопленки, непокрытия и их композиции, обладающие уникальными механическими свойствами.

*Проблема определения механических характеристик плоских пленок и мембран.* При стандартном одноосном испытании на растяжение образцов, вырезанных из полотна в виде полосок, получается значительный разброс результатов испытаний [47]. Невозможно исследовать одноосным способом пленочные композиции, которые имеют пространственно-неоднородную структуру. Сложная структура может возникнуть как в процессе изготовления, так и при эксплуатации (механические дефекты типа трещины, царапины, дефекты от излучения и другие). Трудно описать структуру материала, формы дефектов, включений, отверстий и пор, не говоря уже о моделировании механических характеристик таких композиций. Для исследования сложных структур неприменимы также инденторные методы. Возникает *проблема* определения механических характеристик тонких сложных структур, *проблема* изучения закономерности влияния различных факторов на изменение их свойств.

*Идея:* перейти от одноосного испытания к двумерным, используя экспериментально-теоретический подход и определять интегральные механические характеристики тонких структур как «материал-конструкция». На экспериментальном этапе производится мониторинг за формой деформирования образцов, закрепленных по контуру и подвергающихся воздействию равномерного давления. Далее, используя соотношения нелинейной теории оболочек, определяют механические характеристики, в частности, модуль упругости или условный упругости. Для образцов, имеющих несплошную структуру, применяют подложку из сплошной пленки. Способ развит применительно к тонким и очень тонким пленочным композициям, в том числе нанопленкам.

*Проблема определения механических характеристик неплоских пленок и мембран.* Из функционального назначения пленки и мембраны иногда целесообразно изготавливать неплоской формы, например, сферической, тороидальной или другой сложной исходной формой поверхности. Они, наряду с неплоской исходной геометрией, могут иметь различную сложную структуру, заданную конструктором или приобретенную в процессе изготовления и эксплуатации. *Идея:* подход исследования плоских пленок и мембран развит для исследования механических характеристик оболочечных пленок и мембран. *Практика:* создана установка ДМ-1 и отработаны технологии исследования пленок и мембран, имеющих сложную структуру и дефекты. Получены патенты на изобретения [48-50]. Методика испытаний пленок и мембран, включая нанопленки, а также некоторые полученные результаты опубликованы в работах [45,46,48-69]. *Идея* экспериментально - теоретического метода исследования механических характеристик пленок развита С.Н. Якуповым для определения механических характеристик покрытий, включая, нанопокрывтий в системе «покрытие-подложка» [67,69].

Установка и полученные результаты в составе комплексной разработки были отмечены в Отчете РАН за 2006 год, награждены Серебряной медалью Всемирного Салона "Женева-2007". Высокий уровень разработки отмечен Дипломом ФИПС.

*Исследование механических характеристик тонкостенных элементов конструкций, работающих в агрессивных средах.* Взаимодействие со средой, например, с агрессивной средой, вызывает изменение свойств материала элементов конструкций [6,28,70-77]. Особенно это ощутимо в тонкостенных элементах конструкций. Возникает, в частности, *проблема* выявления закономерностей коррозионного износа и защиты от разрушения элементов конструкций и сооружений, работающих в различных средах [6, 28, 77]. Наибольшую опасность для конструкций представляют случаи, когда одновременно имеет место два и более источника разрушения: концентраторы напряжений + коррозия; волновые явления + коррозия, концентрация напряжений + волновые явления + коррозия.

*Проблема:* разработка способа и установки для исследования изменения характеристики нагруженных тонкостенных элементов конструкций, в том числе элементов, имеющих поверхностные дефекты, находящиеся в агрессивных средах.

*Идея:* развить двумерный подход определения механических характеристик пленок и мембран для исследования нагруженных элементов конструкций. Разработана методика исследований [6,25,63,71] и создана установка ДМК-1. Получен патент РФ на изобретение №2296976 [78]. Выполнен ряд исследований по определению механических характеристик нагруженных тонкостенных элементов конструкций, находящихся в аг-

рессивной среде, в том числе исследования влияния различных дефектов [79-83]. Установка и полученные результаты были отмечены в Отчете РАН за 2006 год, а также награждены: Серебряной медалью Всемирного Салона "Женева-2007" и Дипломом с Медалью 6 Международной выставки "Лаборатория Экспо-2008". Высокий уровень разработки отмечен в Дипломе ФИПС.

Начаты исследования по изучению коррозионного износа тонкостенных элементов конструкций, находящихся в перемешиваемой жидкой среде [84,85], а также изучение влияния физических полей на коррозионный износ [85,86].

**Предотвращение разрушения конструкции крупногабаритных градирен СК-1200.** Строительные конструкции градирен эксплуатируются в тяжелых условиях: кроме силовых нагрузок они подвержены коррозионному износу [87]. Возникла *проблема* предотвращения разрушения градирен. *Общая идея:* определить критические области конструкции, усилить их, вынести несущие элементы из коррозионно-активной зоны, увеличить эффективность градирен.

*Область основания* – установить бандаж (металлическое кольцо) по внешнему контуру железобетонного кольца основания [87]. *Область наклонных стоек* – установить специальную опорную систему (патент на изобретение №2196209 [88]). Опорная система установлена для усиления падающей градирни В11/А3. *Область цилиндрической части* – установить устройство для усилениязданий и сооружений (патент на изобретение №2343256 [89]). *Область опоры конфузора на верхнее железобетонное кольцо* – усилить конструкцию, позволяющего исключить падение металлической части вовнутрь железобетонной части (патенты №2239033 [90] и №2326218 [91]). *Область горловины* – усилить конструкцию градирни, вынести несущие элементы из коррозионно-активной зоны, увеличить эффективность градирни, увеличивая степень охлаждения (на базе идеи патента №2186182 [92]). Решаются актуальные проблемы обеспечения прочности, долговечности и сейсмостойкости, а также экологические проблемы [6,20-22,24,28,59,76,87-95]. Рекомендации переданы в ОАО НКНХ для реализации, реализация которых позволяет решать возникшие проблемы. Разработки из этого цикла отмечены в Отчетах РАН в 2001, 2002 2004 годах, награждены: Серебряными медалями на 53 Всемирном Салоне «Брюссель-Эврика-2004», на 33 Международном Салоне «Женева-2005», на 12 Московском международном Салоне «Архимед – 2009», Медалью на 6 Международном форуме «Высокие технологии XXI века». Разработки награждены также Дипломами Кабинета министров Республики Татарстан: в 2003-2005 годах.

**Новые конструктивно-силовые схемы лопастей вентилятора крупногабаритных градирен.** Для интенсификации процесса охлаждения воды градирни типа СК-400, СК-1200 снабжены вентиляторами [2,10]. Наиболее уязвимыми элементами вентилятора являются их лопасти, которые в процессе эксплуатации часто выходят из строя, вызывая аварийные ситуации. В градирне СК-1200 смонтировано вентиляторное оборудование, включающее в себя четыре лопасти со сложным аэродинамическим профилем. Для анализа характеристик конструкции лопасти были определены ее жесткостные параметры на растяжение, изгиб и кручение [10]. Перепады жесткостей приводят к зарождению и развитию микротрещин, что подтверждает натурное обследование лопастей. Анализ напряженно-деформированного состояния пластинчатого аналога лопасти на базе сплайнового варианта метода конечных элементов [9,16,17] выявил ряд областей, в которых напряжения незначительны. Сосредоточение значительных площадей поперечного сечения лопасти вблизи ее центра тяжести также является нерациональным. На это указывает результаты натурного обследования, показавшие наличие трещин только на одной из поверхностей лопасти вентилятора.

*Идея:* предложена новая схема силовых элементов лопасти: продольные элементы вблизи корневого сечения веерообразно расходятся от несущей оси. Получен патент РФ на изобретение № 2101640 [96,97]. Конструктивно-силовая схема реализована и установлена на одной из крупногабаритных градирен СК-1200 в ОАО НКНХ. *Идея:* лопасти и ступица вентилятор градирни выполнить как единую конструкцию. Получен патент № 2123139 [96,98]. Использование такой схемы позволяет повысить жесткость и прочность, оптимизировать передачу крутящего момента, уменьшить массу и материалоемкость вентилятора.

Возникает *проблема* увеличения вытяжки. *Идея*: вентилятор для градирни делать многоуровневыми, при этом каждый уровень лопастей может иметь простейшую схему, например, двух лопастная схема. Получен патент № 2218532 [99]. Многоуровневый вариант обеспечивает глубокую вытяжку рабочей среды, появляется возможность уменьшить частоту вращения вентилятора. *Идея*: на поверхности лопасти установить пилоны, выполненные в виде оболочек переменной кривизны. Получен патент № 2234002 [100]. Наличие пилонов обеспечивает равномерность распределения паровоздушного потока, что обеспечивает дополнительную тягу, уменьшает потери воды и выброс вредных веществ в атмосферу. Повышается эффективность охлаждения оборотной воды и появляется возможность снижения частоты вращения вентилятора [101,102]. Следует отметить, что разработки этого цикла отмечены в Отчетах о деятельности РАН в 1999 и 2002 годах. Разработки награждены Серебряными медалями на 53 Всемирном Салоне "Брюссель-Эврика-2004" и на 33 Международном Салоне изобретений «Женева-2005».

**Вариант предотвращения разрушения конструкций крупногабаритного горизонтального отстойника воды.** Конструкции отстойника подвержены существенному износу. Натурное обследование показало аварийное состояние отстойника: отдельные элементы начали разрушаться, наблюдается существенный коррозионный износ панелей, некоторые панели перегородок частично разрушены – имеют трещины и отклонились от вертикали; одна из панелей полностью разрушена, а несколько панелей близки к падению [6,103,104]. Возникла *проблема* предотвращения разрушения отстойника воды.

*Идея* решения проблемы очевидна – усилить конструкцию. Были выявлены критические области отстойника. На основе полученного патента на изобретение РФ №2263191 [104] разработаны варианты усиления конструкции. Рекомендации переданы в ОАО НКНХ для реализации. Реализация рекомендаций позволит предотвратить аварийное разрушение конструкции горизонтального отстойника воды. Авторы разработки награждены: Медалью и Дипломом на 6 Международном форуме “Высокие технологии XXI века”, 2005г., Москва, а также Дипломом III степени Кабинета министров Республики Татарстан.

**Покрытие отстойника.** Одним из составных элементов очистных сооружений являются отстойники, которые были спроектированы и сделаны открытыми. С ужесточением экологических норм возникла *проблема* уменьшения вредных выбросов в атмосферу. В связи с этим появилась *идея* сделать отстойники с покрытиями. При этом форма конструкции должна обеспечивать отсос газов из воздушного пространства бассейна. *Практика*: первым был разработан вариант покрытия в виде синтеза цилиндрической и гладкой пологой конической оболочки [10,70]. Такой вариант был реализован на трех отстойниках. Однако такие покрытия имели существенные недостатки. Срок службы покрытий оказался не более 8 лет. *Проблема*: необходимо разработать схему покрытия отстойника, исключающая недостатки предыдущего варианта отстойника. *Идея*: было предложено покрытие в виде гофрированной тороидальной оболочки. Такая оболочка обеспечивает высокую жесткость и прочность конструкций при минимальном весе конструкции [10,70]. Проведенный анализ показал, что гофрированная тороидальная оболочка в два с лишним раза легче, чем вариант в виде подкрепленной конической оболочки. Поэтому применение оболочек двоякой кривизны эффективно при создании конструкций минимального веса. Однако недостатком является образование наружной воронкообразной полости в центральной части покрытия, которая является накопителем грязи и осадков.

*Идея*: в качестве второго варианта была рассмотрена гофрированная коническая оболочка. Гофрированная коническая оболочка уступает по жесткостным характеристикам тороидальной гофрированной оболочке при равных весовых параметрах, однако имеет более простую технологию изготовления [70]. Вариант гофрированной конической оболочки оказался в полтора раза легче, чем вариант в виде конической подкрепленной оболочки.

*Идея*: новый вариант конструктивно-силовой схемы покрытия отстойника [105] включает центральный элемент, опертый на центральную опору, и боковые оболочки, опертые одним концом на центральный элемент, а другим на размещенные по периметру

ру покрытия опоры. Центральный элемент составлен из отдельных радиально расположенных расширяющихся от центра к периферии опорных желобов. Боковые оболочки составлены из отдельных радиально расположенных расширяющихся от центра к периферии основных желобов. На центральном элементе и боковых оболочках с нижней стороны установлен защитный усиливающий экран, формирующий радиально расположенные продувочные каналы и закрепленный на стыковочных ребрах желобов посредством планок. Экран расположен в нижней касательной поверхности центрального элемента и боковой оболочки и имеет минимально возможную площадь поверхности. Центральный элемент в совокупности с боковой оболочкой и верхней оболочкой стянут к штоку центральной опоры посредством растяжек из металлических стержней, троса или цепей. Покрытие имеет архитектурно выразительную форму, является пространственно искривленной конструкцией, создает минимальное функционально необходимое пространство и обеспечивает максимальную несущую способность при минимальном весе конструкции. На разработку получен патент на изобретение № 2345198 [105]. Наличие продувочных каналов обеспечивают естественную продувку внутренних полостей металлических обечаек, обеспечивая вынос конденсата от металлических поверхностей и охлаждение поверхности и тем самым снижение коррозионной активности. Методом конечного элемента [106] проведены расчеты варианта конструкций и определены оценочные характеристики элементов конструкции.

**Новые конструктивно-силовые схемы теплообменников.** При эксплуатации теплообменники относительно быстро забиваются или разрушаются, что может привести к техногенным катастрофам. Возникает *проблема* увеличения долговечности теплообменников. Потеря эффективности теплообмена происходит в результате образования накипи в трубных пучках, а разрушение вследствие высокой концентрации напряжений на стыках труб с трубными досками. *Идея*: создать более гибкую конструкцию, чтобы возникающие механические деформации в конструкции разрушали различные отложения, а гибкие связи снижали концентрацию напряжений. Рассмотрены две новые конструктивно силовые схемы теплообменников. В первом варианте [107] трубные доски предлагается изготовить в виде гибких гофрированных пластин. Благодаря высокой деформационной способности трубных досок существенно снижается концентрация напряжений в конструкции и происходит процесс самоочистки от накипи. Получен патент на изобретение №2267070 [107]. Разработка отмечена в Отчете РАН за 2006 год.

Во втором варианте предлагается трубы изготавливать овального поперечного сечения [108]. Получен патент на изобретение №2272232 [108]. Возникновение автоколебаний труб приводит к предотвращению образования накипи и отслоения отложений за счет деформирования каждой трубы. Предложенные конструктивно-силовые схемы позволяют повысить эффективность самоочистки и интенсифицировать теплообмен.

**Стабилизаторы давления в трубопроводных системах.** Одними из эффективных средств гашения волновых процессов в трубопроводных системах являются стабилизаторы давления [25,109-111]. Особенностью стабилизаторов давления является то, что они не нарушают форму трубопровода и имеют небольшое гидравлическое сопротивление. К стабилизаторам давления предъявляются высокие требования. Возникает *проблема* обеспечения надежности и эффективности функционирования стабилизаторов давления. *Идея*: поскольку одним из основных элементов стабилизатора давления является упругий элемент, но надежность работы упругого элемента является основным фактором достижения цели. Основными параметрами упругого элемента являются: упругая характеристика, жесткость и податливость. Некоторые фрагменты расчета упругих элементов приведены [25,109-111].

**Предохранительные разрывные мембраны.** В случае превышения допустимого давления в емкостях предохранительные разрывные мембраны, в отличие от традиционных клапанов, почти мгновенно разрываются и предотвращают разрушение самих емкостей. К предохранительным мембранам, являющимся объектами Госгортехнадзора, предъявляются очень высокие требования к диапазону их срабатывания. Возникает *проблема* изготовления предохранительных мембран, чтобы разброс давления срабатывания в одной партии мембран был минимальным, то есть формование предохранительных мембран со стабильными параметрами.



*Идея:* партию мембран изготавливать из прокатных листов с однородными свойствами и постоянными геометрическими параметрами практически в одинаковых условиях. *Практика:* если на свойства и параметры прокатки изготовитель мембран не может повлиять, то создание одинаковых условий при формировании он может обеспечить с определенной точностью, например, включив в систему формирования мембраны ресивер, обеспечивающий постоянство давления формирования для каждой мембраны, а также завершение формирования мембраны при достижении заданной высоты купола. Такое устройство было спроектировано и реализовано в металле [112]. Установка позволяет изготавливать высокоточные предохранительные мембраны различных размеров. На устройство для изготовления и контроля куполообразных предохранительных мембран получен патент на изобретение №1756786 [113]. Отработана технология производства предохранительных мембран. Установка совершенствуется и приспособлена для решения новых задач. В частности, установка позволяет проводить испытания образцов различных размеров. Ресивер обеспечивает постоянство давления нагружения для всех образцов испытываемой партии и, тем самым, обеспечивает стабильность экспериментальных результатов. При различных значениях давления нагружения производится замер высоты подъема купола. Кроме защиты от разрывов трубопроводных систем. В случае превышения допустимого давления в трубопроводе мембрана разрывается и содержимое трубопровода стравливается в собирательную емкость, а информация о разрушении мембраны подается в диспетчерский пункт.

**Новые крепежные детали, способ «лечения» трещин.** Одной из причин разрушения конструкций является наличие концентраторов. Наиболее опасным концентратором является трещина [3]. Появление трещины еще не означает «гибель» конструкций. Разрушение произойдет тогда, когда длина трещины превысит критическую длину. В связи с этим возникает *проблема* предотвращения разрушения конструкции: как приостановить развитие трещины? как «продлить» жизнь конструкции, в которой появилась трещина?

*Идея:* создать поля сжатия в области трещины, используя накладки, изготовленные из материала с «эффектом памяти формы». Разработаны способ и крепежные элементы из материала с «эффектом памяти формы» для соединения с натягом элементов конструкций, для приостановки развития трещин [114-118]. Крепежные элементы, приклеенные (прикрепленные) к соединяемым элементам или к берегам трещины, при нагреве притягивают их друг к другу. Получен патент на изобретения №2310791 «Способ ремонта трещин в тонкостенных оболочечных конструкциях» [114]. При использовании накладок происходит перераспределение поля напряжения и уменьшение разрывающих усилий в вершине трещины.

Рассмотренные плоские крепежные элементы по патенту №2310791 создают усилия сжатия в плоскости, касательной к поверхности конструкции, оболочки... В тонкостенных оболочках возникает еще *проблема* обеспечения поперечной жесткости в области дефекта. *Идея:* для решения этой проблемы можно использовать, например, установкой двух, закрепленных между собой накладок, образующих пространственный угол. *Практика:* получено решение ФИПС о выдаче патента [115] по заявке на изобретение №2007128989/11 «Крепежный элемент «ЯМСИ». Крепежный элемент обеспечивает соединение сложных по форме деталей, имеющих поверхности различной кривизны, или фрагментов детали, разъединенных вследствие появления трещины, позволяет стягивать соединяемые детали или берега трещины и обеспечивает поперечную жесткость конструкций в области соединения, а также исключает взаимное смещение деталей или берегов трещины в поперечном направлении.

Установкой «лечащих» накладок в области трещин можно влиять на распределение интенсивности напряжений в панели. Для эффективного использования разработанных крепежных элементов необходимо научиться правильно их расставлять, то есть возникает *проблема* рационального размещения «лечащих» накладок. *Идея:* выполнить численные исследования, в частности, исследовать напряженно-деформированное состояние панели с трещинами. *Практика:* методом конечных элементов исследована

«панель с дефектами в виде одной и трех параллельных трещин» и система «панель с дефектами + накладки, в виде тонких полос» [116-118]. Численные результаты были получены на базе расчетного комплекса ЭРА-ПК2000 [106].

Для эффективного использования разработанных крепежных элементов необходимо научиться определять характеристики крепежных элементов, то есть возникает *проблема* идентификации – *проблема* определения усилий и деформаций, которые создают каждый тип-размер крепежного элемента. *Идея*: разработать способ и установку, которая воспроизводит работы, совершаемые крепежными элементами в процессе работы. *Практика*: разработана установка для определения механических характеристик крепежных элементов при температурном воздействии. Авторы разработки награждены Бронзовой медалью и Диплом 37-го Международного Салона «Женева-2009». Высокий уровень разработки отмечен также в Дипломах ФИПСа.

#### Л и т е р а т у р а

1. Научные открытия, перевернувшие мир. Как это было. Редактор-консультант Джон Грибин. Изд-во Контэнт. 2008. 224 с.
2. Якупов Н.М., Галимов Ш.К., Хисматуллин Н.И. От каменных глыб к тонкостенным конструкциям. Казань, Изд-во SOS, Казань, 2001. 96 с.
3. Якупов Н.М. Строительные конструкции: этапы и перспективы развития. Учебное пособие. Казань, КГАСУ, ИММ КазНЦ РАН, 2006. 154 с.
4. Муштару Х.М., Галимов К.З. Нелинейная теория упругих оболочек. Казань: Таткнигоиздат, 1957. 431 с.
5. Муштару Х.М. Нелинейная теория оболочек. М.: Наука, 1990. 223 с.
6. Якупов Н.М. Лаборатория нелинейной механики оболочек: история и разработки последних лет. ИММ КазНЦ РАН, Казань, Изд-во КГУ, 2006. 98 с.
7. Корнишин М.С. Нелинейные задачи теории пластин и пологих оболочек и методы их решения. М.: Наука, 1964. 192 с.
8. Корнишин М.С., Исанбаева Ф.С. Гибкие пластины и панели. М.: Наука, 1968. 260 с.
9. Якупов Н.М., Серазудинов М.Н. Расчет упругих тонкостенных конструкций сложной геометрии. Казань: ИММ КазНЦ РАН, 1993. 206 с.
10. Якупов Н.М. Прикладные задачи механики упругих тонкостенных конструкций. Казань: ИММ КНЦ РАН, 1994. 124 с.
11. Вахитов М.Б., Паймушин В.Н., Якупов Н.М. К решению плоской задачи подкрепленных панелей переменной жесткости // Изв. ВУЗ. Авиационная техника 1978, №2.
12. Андреев С., Корнишин М.С., Паймушин В.Н., Фирсов В.А., Якупов Н.М. Исследования оболочек сложной геометрии на основе классических и неклассических моделей. Пятый Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике. “Наука” Казахской ССР. Алма-Ата. 1981. С.26.
13. Корнишин М.С., Паймушин В.Н., Якупов Н.М. Гибкие двусвязные пластины со сложным очертанием контура // Статика и динамика оболочек. Тр. семинара, вып.12, Казань, 1979. С.80-91.
14. Якупов Н.М. Напряженно-деформированное состояние гибких двусвязных пластин со сложным очертанием контура // Прочность и устойчивость оболочек. Тр. семинара, вып.13, Казань, 1980.
15. Якупов Н.М. Изгиб гибких гофрированных панелей // Исследования по теории оболочек. Труды семинара. Вып.15. Казань, 1982.
16. Якупов Н.М. Об одном методе расчета оболочек сложной геометрии // Исследования по теории оболочек. Труды семинара. Казань: КФТИ КФАН СССР, 1984. Вып.17. Ч.II. С.4-17.
17. Корнишин М.С., Якупов Н.М. Сплайновый вариант метода конечных элементов для расчета оболочек сложной геометрии // Прикладная механика. 1987. Т.23. № 3. С.38-44.
18. Корнишин М.С., Якупов Н.М. Сплайновый вариант МКЭ в сферических координатах // Прикладные проблемы прочности и пластичности. 1988. С.74-80.
19. Корнишин М.С., Якупов Н.М. К расчету оболочек сложной геометрии в цилиндрических координатах на основе сплайнового варианта МКЭ // Прикладная механика. 1989. Т.25. № 8. С.53-60.
20. Якупов Н.М., Киямов Х.Г., Галявиев Ш.Ш., Хисамов Р.З. Методы и подходы исследования напряженно-деформированного состояния конструкций сложной геометрии // Строительство. Известия ВУЗов. №8 (524), 2002. С.14-18.
21. Якупов Н.М., Галявиев Ш.Ш., Хисамов Р.З. Метод исследования напряженно-деформированного состояния конструкций сложной геометрии // Актуальные проблемы механики сплошной среды. Казань: ИММ КазНЦ РАН, 2001. С.147-158.
22. Якупов Н.М., Галявиев Ш.Ш. Метод исследования НДС тонкостенных конструкций сложной геометрии // Монтажные и специальные работы в строительстве. Выпуск 8 - 9. 2001. С.32-37.

23. Якупов Н.М., Галявиев Ш.Ш., Хисамов Р.З. Метод исследования напряженно- деформированного состояния конструкций сложной геометрии // Вестник РУДН. Инженерные исследования. Вып.1. 2002. С.27-31.
24. Якупов Н.М., Галявиев Ш.Ш. Метод исследования напряженно-деформированного состояния тонкостенных конструкций сложной геометрии// Двойные технологии, №4, 2001. С.56-59.
25. Низамов Х.Н., Сидоренко С.Н., Якупов Н.М. Прогнозирование и предупреждение коррозионного разрушения конструкций // Москва, Изд-во РУДН, 2006. 355 с.
26. Якупов Н.М., Киямов Х.Г., Киямов И.Х., Якупов С.Н. Расчет напряженно- деформированного состояния элементов оболочек сплайновым вариантом метода конечных элементов // Известия КГАСУ. №1 (7) / 2007. С.35-42.
27. Якупов Н.М. Новая конструктивно-силовая схема лопасти вентилятора градирни// Восьмой Всерос. съезд по теоретической и прикл. механике. Пермь, 2001. С.619-620.
28. Якупов Н.М., Нургалеев А.Р., Нуруллин Р.Г., Якупов С.Н. Предотвращение разрушения строительных конструкций крупногабаритной градирни СК-1200 // IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Н.Новгород. Изд-во ННГУ. 2006. С.160-161.
29. Якупов Н.М. К расчету трехслойных оболочек сложной геометрии // Прочность и устойчивость оболочек. Труд семинара, вып.19. Ч.2.Казань, 1986. С.4-16.
30. Якупов Н.М. Суперэлемент сплайнового варианта МКЭ для расчета составных оболочек сложной геометрии// Прочность и устойчивость оболочек. Тр. сем., вып.19, ч.2. Казань, 1986.
31. Якупов Н.М. К расчету оболочек средней толщины сложной геометрии сплайновым вариантом МКЭ // Теории и методы исследования пластин и оболочек сложной формы. Межвуз. сборник. Казань, 1987.
32. Корнишин М.С., Якупов Н.М. Сплайновый вариант МКЭ в сферических координатах // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Всесоюзный межвузовский сборник, 1988.
33. Якупов Н.М., Сагадеев Р.Г. Расчет лопатки компрессорного колеса // Труды семинара. Вып.21. Казань, Горький, 1988.
34. Якупов Н.М. Фрагмент оболочек сложной геометрии в тороидальной системе координат // Труды семинара. Вып.21. Казань, 1988. С.130-137.
35. Yakupov N.M. The structures elements under the effect of the Temperature field // Research in hypersonic flows and hypersonic technologies, TsAGI, 1994.
36. Якупов Н.М. Развитие варианта МКЭ для расчета конструкций со сложной структурой материала // Расчет тонкостенных элементов конструкций химического машиностроения. Межвуз. сб. КГТУ. Казань.1997. С.142-145.
37. Якупов Н.М., Киямов Х.Г., Якупов С.Н. Оболочки сложной геометрии с переменным модулем упругости // Актуальные проблемы нелинейной механики оболочек. Казань: Изд-во КГУ, 2008. С.133-135.
38. Корнишин М.С., Якупов Н.М. К расчету оболочек сложной геометрии // Эксплуатационная и конструктивная прочность судовых конструкций. 8 Бубновские чтения. Горький, 1988.
39. Якупов Н.М. Вариант МКЭ для исследования поведения конструкций со сложной структурой материала // IX конференция по прочности и пластичности. Сб. аннотированных докладов. М., 1996. С.116.
40. Якупов Н.М., Киямов Х.Г. К расчету двумерных и трехмерных элементов конструкций сложной геометрии // Труды Международной научно-практической конференции «Инженерные системы - 2009». М.: РУДН, 2009. Т.II. С.355-361.
41. Якупов Н.М., Киямов Х.Г., Мифтахутдинов И.Х. Теоретико-экспериментальный подход к параметризации поверхностей сложной геометрии // Сб.: Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 15-летию ИММ КазНЦ РАН. Изд-во КГУ, 2006. С.227-234.
42. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Якупов С.Н., Мифтахутдинов И.Х., Киямов Х.Г. Экспериментальный способ параметризации минимальных поверхностей со сложным контуром. Патент на изобретение РФ № 2374697.
43. Якупов Н.М., Якупова З.Н. Мифтахутдинов И.Х., Мифтахутдинов А.И. Способ изготовления ребристых оболочек отрицательной кривизны. Патент № 2255864.
44. Якупов Н.М., Якупова З.Н. Мифтахутдинов И.Х., Мифтахутдинов И.И. Способ изготовления ребристых оболочек положительной кривизны. Патент №2295446.
45. Якупов Н.М., Якупов С.Н. Методы расчета пленочных элементов конструкций: Учебное пособие. Казань, КГАСУ, 2007. 117 с.
46. Якупов Н.М., Якупов С.Н. Пленки неоднородной структуры // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. №1. 2009. С.60-70.
47. Курьянов В.Н. Пленочно-тканевые материалы для строительных конструкций. Казань: КИСИ, 1989. 94 с.
48. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Галимов Н.К., Галявиев Ш.Ш. Способ определения прочностных свойств пленочных материалов: Патент РФ № 2184361 на изобретение.

49. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Нурғалиев А.Р., Якупов С.Н. Способ определения прочностных свойств тонкослойных материалов: Патент РФ № 2310184 на изобретение.
50. Якупов Н.М., Курриянов В.Н., Нуруллин Р.Г., Якупов С.Н. Способ определения прочностных свойств тончайших пленок и нанопленок и устройство для его осуществления. Заявка на патент № 2007149083/28.
51. Якупов Н.М., Галимов Н.К., Леонтьев А.А. Экспериментально-теоретический метод исследования прочности полимерных пленок // Механика композиционных материалов и конструкций. 2000. Т.6, №2. С.238-243.
52. Якупов Н.М., Галимов Н.К., Леонтьев А.А. Экспериментально - теоретическое исследование прочности полимерных пленок // Проблемы прочности и пластичности. Межвузовский сборник. Изд-во Нижегород. ун-та. Н.Новгород, 2000. С.139-142.
53. Якупов Н.М., Галимов Н.К., Леонтьев А.А., Нурғалиев А.Р. Экспериментально - теоретический метод исследования полимерных пленок // Актуальные проблемы механики сплошной среды. ИММ КазНЦ РАН, Казань. 2001. С.137-146.
54. Якупов Н.М., Галимов Н.К., Нурғалиев А.Р., Салихов Э.Н. Прочность тонких пленок с дефектами // Проблемы прочности и пластичности. Межвузовский сборник. Изд. Нижегородского ун-та. Н.Новгород, 2002. С.131-134.
55. Якупов Н.М., Галимов Н.К., Нурғалиев А.Р., Нуруллин Р.Г. Экспериментально- теоретический метод исследования механических свойств пленок и мембран со сложной структурой материала// Тр. Математ. центра им. Н.И. Лобачевского. Т. 28. Модели механики сплошной среды. Матер. XVII сессии Международной школы по моделям механики сплошной среды. Казань: Изд-во Казан. математ. общ., 2004. С.63-67.
56. Якупов С.Н., Нуруллин Р.Г., Шафиғуллин Р.И., Якупов Н.М. Устройство для испытания пленочных композиций и некоторые результаты исследования пленок с дефектами // Тр. XXI Межд. конф. по теории оболочек и пластин, СГТУ, Саратов, 2005. С.249-251.
57. Якупов Н.М., Галавиев Ш.Ш., Нурғалиев А.Р., Якупов С.Н. Состояние конструкций градиен и предотвращение их разрушения // Проблемы энергетики, 2006, №7-8. С.36-42.
58. Якупов Н.М., Якупов С.Н., Шафиғуллин Р.И., Шағидуллина Л.Н. О влиянии солнечного излучения на механические характеристики полимерных пленок// Пленки и покрытия - 2007. Тр. 8 Межд. конференции. 22-25 мая 2007. С-Пб. Изд-во Политехнического ун-та, 2007. С.108-110.
59. Якупов Н.М., Якупов С.Н., Шафиғуллин Р.И. Механика полимерных пленок, подверженных воздействию солнечного излучения и минусовых температур // XVIII сессия Межд. школы по моделям механики сплошной среды. Саратов, 2007. С.305-308.
60. Якупов Н. М., Курриянов В.Н., Якупов С.Н. Исследование механических характеристик полимерных пленок, подверженных воздействию солнечного облучения и отрицательных температур // Российская академия архитектуры и строительных наук: Вестник отделения строительных наук. Период. науч. изд. В.12. Белгород, 2008. С.301-310.
61. Якупов Н. М., Курриянов В.Н., Нуруллин Р.Г., Якупов С.Н. К исследованию механических характеристик тонких пленок и нанопленок // Международный форум по нанотехнологиям. Сборник тезисов докладов научно-технологических секций. Т.1. М., РОСНАНО. 2008. С.543-545.
62. Якупов Н. М., Курриянов В.Н., Якупов С.Н. К исследованию механических характеристик пленок и пленочных структур // Известия КГАСУ. №1(9)/2008.С.106-112.
63. Якупов Н.М., Нурғалиев А.Р., Якупов С.Н. Методика испытаний пленок и мембран в условиях равномерно распределенного поверхностного давления // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т.74, №11. С.54-56.
64. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Якупов С.Н. Методология исследования механических характеристик тонких пленок и нанопленок // Вестник машиностроения. 2009. № 6. С.44-47.
65. Якупов Н.М., Галимов Н.К., Якупов С.Н. Экспериментально-теоретический подход определения механических характеристик плоских и неплоских пленок и мембран со сложной структурой // Пленки и покрытия - 2009. Труды 9 Международной конференции. 26-29 мая 2009. С-Пб. Изд-во Политехн. ун-та, 2009. С.97-99.
66. Якупов Н.М., Якупов С.Н. Определение механических характеристик пленок с порами, нановключениями и нанопокровками // Сборник тезисов докладов участников Второго Международного форума по нанотехнологиям. М.: РОСНАНО, 2009. С.427-429.
67. Якупов С.Н. Способ определения механических характеристик тонких покрытий в системе «покрытие-подложка»// Сб. тез. докладов участников Второго Международного конкурса научных работ молодых ученых в области нанотехнологий. М.: РОСНАНО, 2009. С.488-489.
68. Yakupov N.M., Yakupov S.N. Definition of mechanical characteristics of films with the pores, nanoinclusions and nanocoatings// Abstracts. The second Nanotechnology International Forum. M.:Rusnanotech, 2009. P. 344-346.

69. *Yakupov S.N.* Way of definition of mechanical characteristics of thin coverings in system «the covering – the substrate» // Abstracts. The second International Competition of Scientific Papers in Nanotechnology for Young Researchers. M.: Rusnanotech, 2009. P.439-440.
70. *Якупов Н.М., Хисматуллин Н.И.* Механика Нижнекамскнефтехима. Казань, 1996. 224с.
71. *Сидоренко С.Н., Якупов Н.М.* Коррозия – союзник аварий и катастроф. М.: Изд-во РУДН, 2002. 93 с.
72. *Якупов Н.М., Хисматуллин Н.И.* О причинах аварии и техногенных катастроф на нефтехимических предприятиях // SOS, Казань, 1997. Вып.1.
73. *Гатауллин И.Н., Чайковский В.Г., Якупов Н.М.* САПР - "Противокор-розионная защита" и анализ работы конструкций, подверженных коррозионному износу // Вестник КГТУ, №4, Казань, 1997. С.12-14.
74. *Якупов Н.М., Гатауллин И.Н., Хисматуллин Р.Н.* Коррозия - союзник аварий и катастроф в промышленных предприятиях // SOS, вып.2. Казань, 1998. С.53-56.
75. *Якупов Н.М., Хисматуллин Н.И.* Некоторые проблемы трубопроводов в АО НКНХ // SOS, вып.3, Казань, 1999. С.34-36.
76. *Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Нургалеев А.Р.* О состоянии строительных конструкций градирен СК-1200 и способах их усиления // Актуальные проблемы механики сплошной среды. ИММ КазНЦ РАН, Изд-во КГУ, 2004. С.119-128.
77. *Якупов Н.М., Нургалеев А.Р.* О природной защитной пленке // Пленки и покрытия – 2007. Тр. 8 Межд. конф. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2007. С.111-113.
78. *Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Нургалеев А.Р., Якупов С.Н.* Способ испытаний образцов металлических мембран под напряжением и устройство для его осуществления. Патент на изобретение №2296976.
79. *Нургалеев А.Р., Якупов Н.М.* Исследование механических характеристик тонкостенных элементов конструкций, подверженных коррозионному износу и находящиеся под действием нагрузки // Актуальные проблемы механики сплошной среды к 15-летию ИММ КазНЦ РАН. Казань. 2006. С. 244-254.
80. *Якупов Н.М., Нургалеев А.Р.* О влиянии дефектов на механические характеристики мембран, работающих в агрессивной среде // Изв. КГАСУ, Казань, 2007, № 1(7). С.56-59.
81. *Якупов Н.М., Нургалеев А.Р.* Влияние поверхностных дефектов на механические характеристики металлических мембран, находящихся в коррозионной среде // XVIII сессия Межд. школы по моделям механики сплошной среды. Саратов, 2007. С.303-305.
82. *Якупов Н.М., Нургалеев А.Р.* Влияние механических дефектов на свойства нагруженных тонкостенных элементов конструкций в агрессивной среде // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2008, № 3, С. 14-18.
83. *Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н.* Коррозионный износ в растянутых и в сжатых поверхностях // Пленки и покрытия – 2009: Тр. 9-й Межд.конф. 26-29 мая 2009г. С.Пб: Изд-во политехнического университета, 2009. С.100-102.
84. *Якупов Н.М., Шафигуллин Р.И.* Коррозионный износ тонкостенных элементов конструкций в перемешиваемой жидкой среде // Пленки и покрытия – 2009: Труды 9-й Межд. конференции. 26-29 мая 2009 г. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. С.103-105.
85. *Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Шафигуллин Р.И.* Экспериментальное исследование влияния внешних факторов на коррозионный износ элементов конструкций // Труды второй международной конференции «Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела». Казань. КГУ, 2009. С.442-445.
86. *Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р.* Исследование механических характеристик тонкостенных элементов, находящихся в агрессивной среде под воздействием магнитного поля // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики. Том 2. Матер. V Всер. н.-техн. конф. Казань. 2009. С.381-385.
87. Разработка общих рекомендаций по ремонту строительных конструкций градирен СК 1200. Н.-т. отчет по договору НКНХ. Отв. исп. д.т.н. Якупов Н.М. Казань, 2008. 113с.
88. *Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Галяев Ш.Ш., Киреев Ю.А., Якимов Е.В., Нургалеев А.Р.* Опорная система для усиления промышленных зданий: Патент №2196209.
89. *Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Галяев Ш.Ш., Киреев Ю.А., Якимов Е.В., Якупов С.Н.* Устройство для усиления зданий и сооружений. Патент №2343256.
90. *Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Галяев Ш.Ш., Киреев Ю.А., Якимов Е.В., Якупов С.Н.* Устройство для усиления конструкции градирни: Патент №2239033.
91. *Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Якупов С.Н., Галяев Ш.Ш., Киреев Ю.А., Якимов Е.В.* Устройство для усиления конструкции градирни. Патент №2326218.
92. *Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Галяев Ш.Ш., Киреев Ю.А., Якимов Е.В., Нургалеев А.Р.* Башенная вентиляционная градирня: Патент РФ на изобретение №2186182.

93. Якупов Н.М., Гатауллин И.Н. Определение состояния экспериментальных градирен // Расчет тонкостенных элементов конструкций в химическом машиностроении: Межв.сб., КГТУ, Казань, 1997. С.28-32.
94. Ахмадиев Ф.Г., Якупов Н.М., Гатауллин И.Н., Киямов Х.Г. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния градирни // Известия КГАСА, 2003, №1. С.39-41.
95. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Якупов С.Н. и др. Градирня. Патент №2225929.
96. Якупов Н.М. Новая конструктивно - силовая схема лопасти вентилятора градирен // Восьмой Всерос. съезд по теоретической и прикладной механике. Пермь, 2001. С.619-620.
97. Якупов Н.М., Шаймарданов И.Г., Хисматуллин Н.И. и др. Лопасть вентилятора градирни. Патент РФ №2101640.
98. Федяев В.Л., Якупов Н.М. и др. Вентилятор для градирни. Патент РФ №2123139.
99. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Галяев Ш.Ш., Якупов С.Н. Вентилятор для градирни. Патент РФ на изобретение №2218532.
100. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Шишкин А.А., Якупов С.Н. Вентилятор для градирни. Патент РФ на изобретение №2234002.
101. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г. Новые конструктивно-силовые схемы лопастей вентилятора крупногабаритных градирен // Вестник машиностроения, №5.2006. С.83-86.
102. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Якупов С.Н. Вентиляторы для градирен // Актуальные проблемы механики сплошной среды. Казань: Изд-во КГУ, 2004. С.109-118.
103. Якупов Н.М., Ахметзянов Ф.Х., Якупов С.Н. и др. Предотвращение разрушения строительных конструкций горизонтального отстойника // Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 15-летию ИММ КазНЦ РАН. 2006. С.235-243.
104. Якупов Н.М., Гильманов Х.Х., Нуруллин Р.Г., Нургалеев А.Р., Якупов С.Н. и др. Опорная система для усиления строительных сооружений. Патент № 2263191.
105. Якупов Н.М., Гильманов Х.Х., Нуруллин Р.Г., Галяев Ш.Ш., Галимуллин Ф.А., Киреев Ю.А., Якимов Е.В., Якупов С.Н. «Покрытие». Патент №2345198.
106. Лукашенко В.И., Абдюшев А.А. и др. Экспертиза, расчет, анализ пространственных конструкций. Казань: КГАСУ, 2006. 321 с.
107. Якупов Н.М., Гильманов Х.Х., Нуруллин Р.Г., Галяев Ш.Ш., Якупов С.Н. Теплообменник. Патент на изобретение РФ №2267070.
108. Низамов Х.Н., Хисамеев И.Г., Якупов Н.М., Максимов В.А., Нуруллин Р.Г., Применко В.Н., Низамова Г.Х. Теплообменник. Патент на изобретение РФ №2272232.
109. Низамов Х.Н., Дербуков Е.И., Ильгамов М.А., Якупов Н.М. Разработка, создание и внедрение гасителей колебаний давления для предотвращения аварий в трубопроводных системах // Безопасность производственных объектов. ИММ РАН, МЧС РТ, Казань. 1996. С.13-98.
110. Ганиев Р.Ф., Низамов Х.Н., Дербуков Е.И. Волновая стабилизация и предупреждение аварий в трубопроводах. М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 1996. 260с.
111. Низамов Х.Н., Якупов Н.М., Спиридонов С.В., Тагасов В.И. Гашение гидравлических ударов в системах тепло-водоснабжения //SOS, Казань, 1998. В.2. С.27-30.
112. Сунгатуллин И.Я., Якупов Н.М., Хисматуллин Н.И. Описание экспериментальной установки и технологии для исследования вопросов прочности и устойчивости элементов тонких пластин и оболочек различных очертаний с учетом температурного фактора // Исследования по теории оболочек. Тр.сем., в.27. Казань, 1992. С.99-105.
113. Сунгатуллин И.Я., Якупов Н.М., Хисматуллин Н.И. Устройство для изготовления и контроля куполообразных предохранительных мембран. Патент РФ №1756786.
114. Якупов Н.М., Якупов С.Н., Мифтахутдинов И.Х., Мифтахутдинов А.И. Способ ремонта трещин в тонкостенных оболочечных конструкциях. Патент №2310791.
115. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Мифтахутдинов И.Х., Якупова Р.Н. Крепежный элемент «ЯМСИ» заявка №2007128989/11, решение ФИПС о выдачи патента.
116. Якупов Н.М., Абдюшев А.А. Параметрическое исследование лечащих накладок средствами расчетного комплекса ЭРА-ПК2000 // Известия КГАСУ. №2(8)/2007. С.61-64.
117. Якупов Н.М., Абдюшев А.А., Мифтахутдинов И.Х., Якупов С.Н. Эффективный способ ремонта трещин в оболочечных конструкциях // Актуальные проблемы нелинейной механики оболочек. Казань: Изд-во КГУ, 2008. С.131-133.
118. Якупов Н.М., Абдюшев А.А. Исследование влияния лечащих накладок на напряженно-деформированное состояние панелей с системой трещин // Известия КазГАСУ. 2009 г., №2 (11).

## MECHANICS: A PROBLEM – AN IDEA – A PRACTICE

N.M. Yakupov

A dialectics of cognition and development one can retrace examining the way of solution one or another problem in the form “a problem – an idea – a practice”. The author tried to follow this natural and dialectic way investigating a problem of mechanics.

**KEY WORDS:** steering lever, wheel, shell, film, membrane, cooling tower