

**Научно-аналитические обзоры**

**МЕХАНИКА ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ:  
ИСТОРИЯ, ДИАГНОСТИКА**

Н.М. ЯКУПОВ, *д-р техн. наук, проф.*  
ИММ КазНЦ РАН, Казань, [yzsrr@kfti.knc.ru](mailto:yzsrr@kfti.knc.ru)

*Оболочки, обладая уникальными свойствами, находят широкое применение. Они воспринимают большие нагрузки, работают в агрессивных средах и испытывают воздействие физических полей. Необходимо оценивать несущую способность тонкостенных конструкций с учетом влияния полей и сред, а также на базе уточненных соотношений теории оболочек. Приводятся фрагменты из истории рождения оболочек и нелинейной теории оболочек, метод оценки механических свойств и подход оценки концентрации напряжений в тонкостенных элементах сложной структуры. Отмечаются новые результаты по исследованию явления коррозии.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** оболочки, тонкостенные конструкции, напряженно-деформированное состояние, нагрузки, среда и физические поля, магнитное поле, коррозия, поверхностные дефекты, механические свойства, модель коррозионного износа, концентрация напряжений, диагностика

Фрагменты из истории рождения оболочек. Путь человечества к современным тонкостенным конструкциям был непростым. Прошли тысячелетия и были сделаны сотни важнейших открытий. Были выполнены научно-исследовательские и технологические разработки, а также проектно-конструкторские работы, прежде чем были созданы рукотворные тонкостенные оболочки. Фрагменты из истории рождения строительных конструкций от каменных глыб до тонкостенных оболочек отражены, в частности в работах [1-3]. В Древнем Египте сооружали грандиозные каменные пирамиды и массивные храмы. Древние греки прославились строительством великолепных храмов. Они, как и древние египтяне, имели представление об арках и сводах. Однако эти конструкционные элементы получили широкое распространение лишь в Древнем Риме, чему способствовало изобретение бетона. «Симфониями» из арок являются акведуки и Колизей (рис.1). Применение арочных структур было началом использования пространственных искривленных конструкций в строительном деле, когда для обеспечения прочности впервые «запрягли» форму поверхности. Появились первые крупногабаритные каменные полусферические купола (оболочки): во II в. в Древнем Риме – Пантеон (рис. 2), в VI в. в Византии – Храм Софии (рис.3). Римский Пантеон до XIX века был непревзойденным примером большого пространственного покрытия.



Рис.1 – Римский Колизей



Рис.2 – Пантеон



Рис.3 – Храм Софии



Рис.4 – Мавзолей. Бухара. 9 - 10 вв.

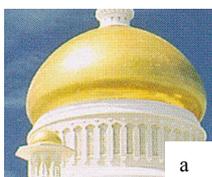
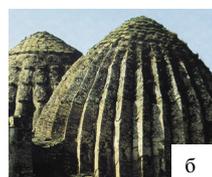


Рис.5 – Купола: а – Мечеть Омара. Бруней; б – Шахи-Зинда. Самарканд. 14 в.; в – Мавзолей Гүри-Эмир. Самарканд. 15 в.



В архитектуре исламских стран появились арки с заостренным контуром (рис.4). Новые формы имели большую выразительность и выгодно отличались в прочностном отношении. Начиная с XII века, начали строить двухслойные купола, между которыми размещали деревянные элементы связи. За счет этого прочность конструкций повышалась при снижении веса. Появились и купола с различной гофрировкой по окружной

координате, что значительно упрочняло конструкцию купола и приводило в восхищение смотрящего (рис.5).

Архитекторы эпохи Возрождения, используя колоннады, арочные галереи, своды и купола, придали своим постройкам величественность и гармоничность. Затем пришел стиль барокко, рококо и классицизм. Произошел возврат к античным строительным конструктивным элементам на новом уровне, их сочетание и противопоставление, а также вариация конструктивных элементов из различных эпох и стилей.

Крупный скачок в строительном деле был сделан в середине XIX века. Здесь революционную роль сыграл железобетон. Относительная толщина покрытий значительно снизилась. Следующим шагом было использование металлических покрытий (рис.6). Они выгодно отличаются относительной легкостью, удобством сборки и позволяют реализовать сложные формы. К металлическим покрытиям относятся и мембранные покрытия (рис.7). Если сравнить тонколистовое мембранное покрытие с пространственным железобетонным покрытием, то эффект очевиден – достигается выигрыш в массе на порядок.



Рис.6 – Металлическое покрытие.  
Вокзал, Лондон



Рис.7 – Мембранное покрытие.  
Комплекс Олимпийский. Москва

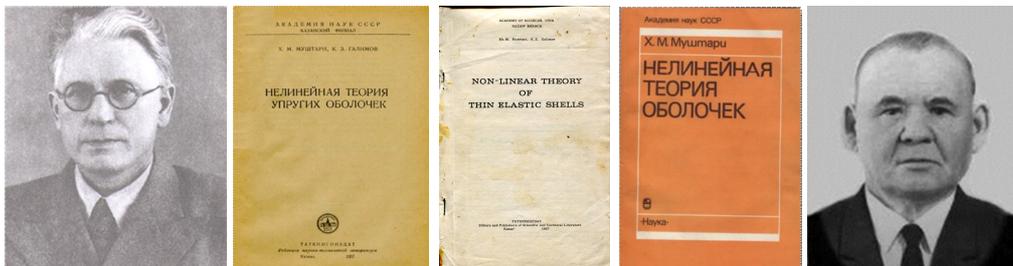
Распространению тонкостенных конструкций способствовали их уникальные свойства, а также технологические возможности и успешное решение научных проблем, в частности, разработка теории оболочек.

**Рождение нелинейной теории оболочек и лаборатории нелинейной механики оболочек.** В связи с запросами практики в начале XX века были заложены основы теории пластин и оболочек. Были сформулированы простейшие геометрические и физические соотношения и получены уравнения равновесия. Это так называемая линейная теория оболочек. Несмотря на использование простейших исходных соотношений уравнения теории оболочек были сложными и громоздкими. Однако простейшие соотношения, заложенные в линейной теории оболочек, не могли дать ответ на многие вопросы практики. Диалектика развития подсказывала необходимость использования более точных геометрических и физических соотношений. Естественным направлением развития стала нелинейная теория оболочек: теория, в которой учитываются нелинейные компоненты в геометрических (связь «деформация – перемещение») и физических соотношениях (связь «напряжение – деформация»).

В 1934 - 1957 гг. Х.М. Муштари заложил основы нелинейной теории упругих оболочек [4-7]. В 1975 г. было опубликовано учебное пособие К.З. Галимова по основам нелинейной теории тонких оболочек [8]. Разрешающие уравнения нелинейной теории многократно усложнялись и приводили в ужас человека, который впервые знакомился с ними. Для решения новых задач создавались различные научные лаборатории. В 1946 году во вновь образовавшемся Казанском физико-техническом институте (КФТИ) Казанского филиала АН СССР для решения актуальных проблем механики тонкостенных конструкций и развития нелинейной механики оболочек был образован сектор механики (основа лаборатории нелинейной механики оболочек – НМО).

**1946 - 1965 гг. – первый этап развития лаборатории нелинейной механики оболочек (НМО).** Новое подразделение – сектор механики КФТИ – в период 1946 – 1965 гг. возглавил ученый механик д.ф.-м.н. профессор Хамид Музафарович Муштари. Первыми сотрудниками сектора механики были К.З. Галимов, Г.П. Цыбульский, С.Г. Винокуров, Р.Г. Суркин, несколько позже начали работать И.В. Свирский (1947 г.), М.С. Корнишин (1951 г.) и другие. Наряду с теоретическими исследованиями выполнялись экспериментальные работы, в частности М.С. Корнишиным, Ф.С. Исанбаевой, Р.Г. Суркиным и др.

Среди фундаментальных работ Х.М. Муштари особое место занимает капитальный труд «Нелинейная теория упругих оболочек» [5], написанный совместно с д.ф.-м.н. профессором К.З. Галимовым. Эта монография, переизданная за рубежом [6], стала настольной книгой во всем мире для многих специалистов в этой области. В 1990 году учениками Х.М. Муштари был опубликован сборник его трудов [7]. В работах [7,9-11] были рассмотрены также вопросы расчета трехслойных оболочек. Информация о первом этапе развития имеется в книгах [12-15].



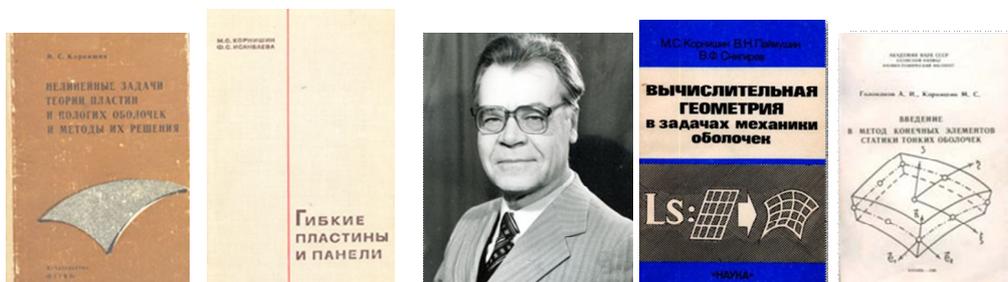
Х.М. Муштари (1900 – 1981)

К.З. Галимов (1909 – 1986)

Усилиями сотрудников НМО одна из красивейших улиц Казани названа именем выдающегося механика XX века профессора Хаида Музафаровича Муштари.

**1965 - 1987 гг. – второй этап развития лаборатории НМО.** В 1965 году сектор механики преобразуется в Отдел теории оболочек (*руководитель Х.М.Муштари*), а одну из двух лабораторий отдела (*лабораторию статики и динамики оболочек*) возглавил д.т.н., профессор Михаил Степанович Корнишин. В 1971 г. лабораторию переименовывают в лабораторию нелинейной теории оболочек, а позже в лабораторию нелинейной механики оболочек (НМО).

Нелинейная теория упругих оболочек интенсивно развивалась. С 1960 - 1980 гг. начался этап применения теории для решения нелинейных задач, развивались методы расчета, рассматривались вопросы сходимости [16,17]. Полученные решения нелинейных задач актуальны и сегодня – используются в качестве эталонных при разработке и проверке новых методов расчета гибких пластин и панелей.



М.С. Корнишин (1920 – 1991)

Рассмотрены вопросы использования вычислительной геометрии и метода конечных элементов в задачах механики оболочек [18,19]. Развивались вариационные методы анализа деформации оболочек [20], решались задачи динамического поведения оболочек, содержащих жидкость и газ [21], рассматривались вопросы изгиба и устойчивости пластин и оболочек с учетом ползучести [22]. Регулярно выходил сборник трудов *“Труды семинара: Исследования по теории оболочек” (выпуски 1 - 21)*.

Большое влияние на развитие нелинейной теории оболочек оказало вторжение электронно-вычислительных машин (ЭВМ) в вычислительные процессы. ЭВМ для решения задач нелинейной механики оболочек начал использовать М.С. Корнишин еще в конце 1950-х годов. К 1980 г. были созданы численные методы и алгоритмы, которые позволяли определять напряженно-деформированное состояние (НДС) тонкостенных элементов конструкций канонической геометрии, а также решать задачи устойчивости.

**1988 - по настоящее время – третий этап развития лаборатории нелинейной механики оболочек (НМО).** С 1 января 1988 г. лабораторию нелинейной механики оболочек возглавляет Нух Махмудович Якупов.

Основные направления научных исследований в НМО на третьем этапе: механика тонкостенных конструкций сложной геометрии; механика пленок и мембран сложной структуры; проблемы коррозионного износа, техногенных катастроф и экологии. Можно отметить, что «Проблема предупреждения техногенных катастроф тонкостенных конструкций и сооружений» входит в Перечень критических технологий РФ, п.21, утвержденный Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. №899.

Наряду с развитием теоретических аспектов, решение практических задач становится одним из основных направлений деятельности лаборатории НМО. Акцент делается на прикладных задачах с внедрением результатов (руководство АН СССР рекомендовало институтам направить усилия на решение практических задач; базовое финансирование в 1989 г. составило 26,6% по сравнению с 1988 г.).

В период 1993 - 2010 гг. опубликованы монографии, учебные пособия и методические указания [1-3,15,23-31], а также сборники «Труды семинара: Исследования по теории оболочек» 25 и 27 выпуски. Разработанная Н.М. Якуповым «Методика расчета упругих элементов стабилизаторов давления», была включена в монографию академика РАН Ганиева Р.Ф. и др. (стр.181-187) [32] (стабилизаторы давления предназначены для защиты емкостей от разрушения при резком увеличении внутреннего давления). Разработки, выполненные на третьем этапе развития лаборатории НМО, награждены 15 медалями Международных Салонов и Выставок:



На третьем этапе опубликованы статьи в журналах: ДАН, МТТ, Doklady Physics, Проблемы прочности, Механика композиционных материалов и конструкций, Вестник машиностроения, Прикладная механика, Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, ИВУЗ: Строительство, Монтажные и специальные работы в строительстве, Двойные технологии, Газовая промышленность, Russian Engineering Research, Наука и техника в газовой промышленности, Doklady Physical Chemistry, SOS и др. [33-98].

Получены 35 патентов РФ на изобретения: №№1756786, 2101640, 2123139, 2184361, 2186182, 2196209, 2214491, 2218532, 2225929, 2234002, 2239033, 2255864, 2263191, 2267070, 2272232, 2295446, 2296976, 2310184, 2310791, 2326218, 2343256, 2345198, 2374697, 2377372, 2380585, 2387973, 2403556, 2421707, 2439537, 2437077, 2500512, 2517149, 2519386, 2547067, 2014145390.

Разработки, выполненные под руководством Якупова Н.М., отмечены в 16 Отчетах о деятельности РАН и в докладах Президиума Российской академии наук: 1999,2001, 2002, 2004, 2006, 2007, 2009, 2011, 2008-2012.

**Метод расчета оболочек сложной геометрии.** Известный испанский архитектор Эдуардо Торроха отмечал: "Лучшим сооружением является то, надежность которого обеспечивается главным образом за счет его формы, а не за счет прочности его мате-

риала". Различают оболочки канонической геометрии, срединная поверхность которых может быть задана аналитическими формулами (информация о таких поверхностях имеется, в частности, в энциклопедии С.Н. Кривошапко и В.Н. Иванова [99]). Однако срединную поверхность не всех оболочек можно описать аналитически – это оболочки неканонической геометрии, которые функционально необходимы и эффективны по своим характеристикам жесткости и прочности.

В НМО разработан эффективный метод расчета тонкостенных оболочек, имеющих сложную геометрию (рис.8) – сплайновый вариант метода конечных элементов (СВ МКЭ-2) [23,24,33-35,48,100]. Используя гипотезу Кирхгоффа - Лява, задача сводится к двумерной задаче. Метод, благодаря синтезу идеи параметризации и метода конечных элементов (МКЭ) с бикубической аппроксимацией искомых переменных в пределах каждого элемента, позволяет получать пространственные искривленные согласованные двумерные конечные элементы. СВ МКЭ-2 реализован в виде комплекса программ для ЭВМ и использован для анализа НДС ряда конструкций из практики [3,24,26,44,45,48, 49,51,54,69,76,101-104,105]. Некоторые вопросы параметризации оболочек сложной геометрии рассмотрены в [106] и в патентах: №2374697, 2517149.

Начато развитие сплайнового варианта МКЭ для определения НДС трехмерных объектов сложной геометрии (рис.9) на базе трехмерных конечных элементов СВ МКЭ-3 [46,71]. СВ МКЭ-3 метод позволяет определять также НДС элементов тонкостенных конструкций в области локальных углублений и дефектов. На базе СВ МКЭ-3 выполнены, в частности, исследования концентрации напряжений в цилиндрической трубе с протяженным углублением, а также в сферической оболочке с локальным углублением [86,88,89].

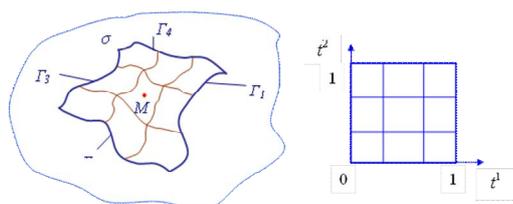


Рис.8 – Параметризация поверхности сложной геометрии

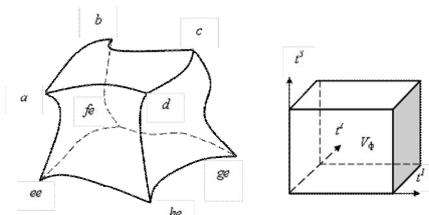


Рис.9 – Параметризация трехмерного тела сложной геометрии

**Экспериментально-теоретический метод исследования жесткости тонкостенных элементов, мембран и пленок.** Достижения науки и техники позволяют производство материалов со сложной структурой (рис.10). При этом возникает проблема определения физико-механических свойств тонкостенных элементов, пленочных и мембранных композиций сложной структуры, в том числе с неплоской исходной геометрией.

Описать геометрию и неоднородность свойств элементов со сложной структурой и с дефектами трудно или вообще невозможно. Стандартный одномерный способ испытания на растяжение полос, вырезанных из листов, дает разброс результатов и не применим для элементов со сложной структурой и с дефектами. Особенно это ощутимо для тонких образцов. Инденторный метод исследования механических характеристик тонкостенных элементов со сложной структурой не всегда эффективен. Молекулярный подход на базе мощных компьютеров также имеет недостатки: возникают трудности при описании сложной структуры на молекулярном уровне, а также задании информации о дефектах на нано и макроуровнях одновременно.

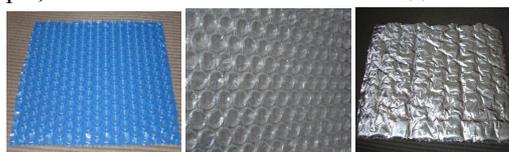


Рис.10 – Мембраны со сложной структурой

В НМО разработан двумерный экспериментально - теоретический метод (ЭТМ) определения приведенных (интегральных) механических характеристик плоских и сферических тонкостенных образцов со сложной структурой (рис.10) и с распределенными дефектами [28,41,43,53,56-62,64,68, 72,73].

На экспериментальном этапе для плоских или сферических образцов (рис.11) строят кривые «прогиб круглого образца  $H$  от давления  $p$ ». Используя математический ап-

парат статистической обработки, производится фильтрация экспериментальных данных, обеспечивая доверительный интервал 95%.

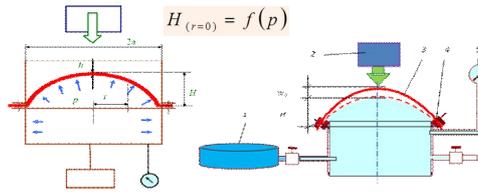


Рис.11 – Схемы установок

На теоретическом этапе строятся кривые деформирования, вычисляются приведенные модули упругости  $E$  или условные модули упругости  $E_{\text{усл}}$ , используя формулы, полученные из нелинейной теории тонких оболочек при больших перемещениях и деформациях и соотношений теории пластичности. На способы испытаний и устройства получены патенты

на изобретения: №№ 2184361, 2296976, 2310184, 2387973, 2403556.

На базе ЭТМ изучено, в частности: влияние шага и глубины поверхностных царапин на изменение жесткостных свойств тонкостенных элементов [57,107,108], влияние воздействия солнечного излучения на механические свойства полимерных пленок с подложкой разного цвета [56,58] и др. Также разработана методика определения механических свойств тонких пленочных материалов с нанопокрывтием [68,109]. ЭТМ развит для исследования механических характеристик биологических мембран [91].

**Исследование механических свойств тонких пленочных материалов с нанопокрывтием.** На полимерную пленку нанесено покрытие «окись титана» ионно-плазменным методом. Исследуя ЭТМ пленку «с» и «без» покрытия определены механические свойства композиции и нанопокрывтия. Наличие покрытия изменяет жесткостные свойства композиции: с увеличением толщины покрытия эффект возрастает (рис.12) [68,109].

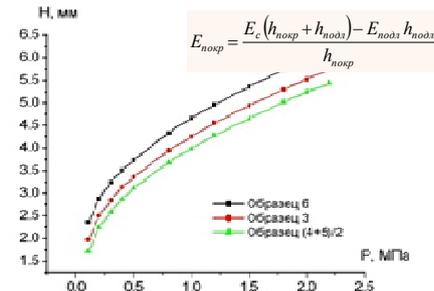


Рис.12 – Зависимость  $p - H$   
Образец №3 – покрытие 50 нм,  
№№4, 5 – покрытие 150 нм

Исследование влияния поверхностных царапин на изменение жесткостных свойств тонкостенных элементов. Экспериментально-теоретический подход развит для анализа жесткостных свойств тонкостенных образцов с царапинами (рис.13) [107,108]. По экспериментальным результатам: вычислены приведенные тангенциальные жесткости на растяжение - сжатие и приведенные жесткости на изгиб; получены модели изменения жесткостных свойств тонкостенных элементов с царапинами. Установлено, в частности, что поверхностные царапины приводят к значительному снижению тангенциальной и изгибной жесткости тонкостенных элементов конструкций.

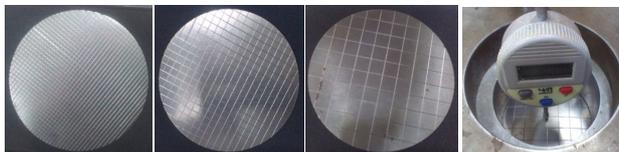
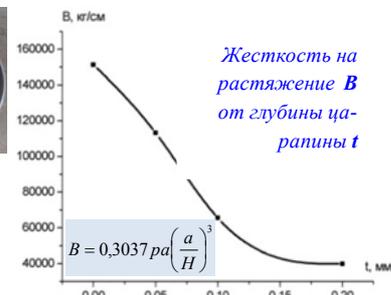


Рис.13 – Исследуемые образцы, фрагмент установки и зависимость жесткости на растяжение  $B$  от глубины дефекта  $t$



**Исследования явления коррозии.** Исследования ЭТМ тонкостенных образцов, подверженных коррозионному износу, позволили установить, что наряду с изменением геометрических параметров, происходит изменение свойств поверхностных слоев вследствие «разрыхления» материала, что приводит к изменению механических характеристик образцов в целом.

Одним из факторов, способствующих разрушению защитной пленки (пассивирующего слоя), является механическая деформация. Очевидно, что защитный слой при деформации элемента также деформируется. Предложена модель влияния механических деформаций на толщину пассивирующего слоя [27], справедливость которой подтверждена в работе [79,80]. На рис.14 приведены характерные кривые этапов коррозионного износа металлических образцов ненагруженных (без деформации), а также при наличии статического и динамического нагрузках. В работе [79,80] на базе ЭТМ установлено, что в коррозионной среде жесткость на растяжение тонкостенных металлических элементов с растянутыми поверхностями уменьшается быстрее, чем для аналогичных элементов со сжатыми поверхностями.

Разработаны способы и устройства испытаний в среде нагруженных прямоугольных и круглых образцов (рис.15) – патенты №№2437077, 2439537. Влияние механических дефектов на свойства нагруженных тонкостенных элементов конструкций в агрессивной среде рассмотрены в [53,57].

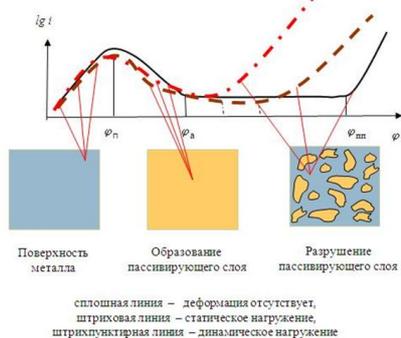
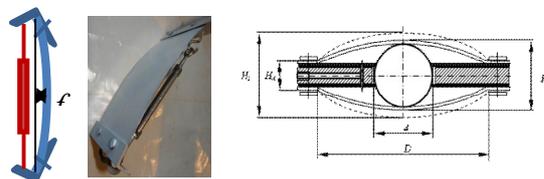


Рис.14 – Зависимость тока  $i$  – от потенциала  $\varphi$

Рис.15 – Прямоугольные и круглые образцы



В НМО начаты работы по изучению влияния магнитного поля (МП) и ультрафиолетового излучения (УФ) на процесс коррозии [70,77,78,82,83,97,98]. Установлено, в частности, что как в воде, так и в кислой среде жесткость на растяжение тонкостенных образцов при воздействии МП снижается медленнее, чем при износе без МП (рис.16) [77,78]. Непрерывное воздействие УФ на стальные образцы, находящиеся в растворе гипохлорита натрия, способствует росту коррозионного износа. Этот эффект сохраняется при различных концентрациях раствора, освещенности поверхности образцов УФ и длительности испытания (рис.17). Там же приведены изображения поверхностей образцов при 10-ти кратном увеличении: 1 - без УФ, 2 - УФ 23,2 Вт/м<sup>2</sup>, 3 - УФ 41,5 Вт/м<sup>2</sup> [82,83].

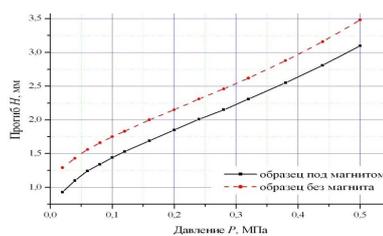
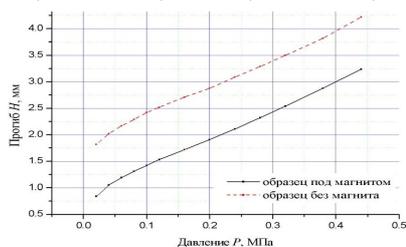
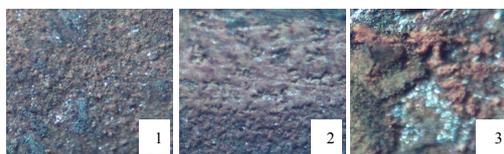
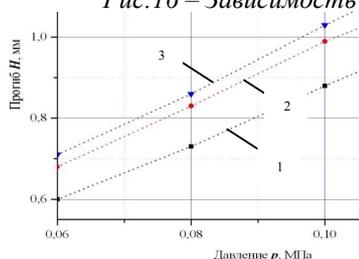


Рис.16 – Зависимость  $p - H$  ( $H_2O$  – слева и 10%  $HCl$  – справа)



Поверхность образцов под микроскопом

Рис.17 – Зависимость  $p - H$  от освещенности

Исследовано влияние направления силовых линий магнитного поля Земли на процесс коррозионного износа металлических образцов [97,98]. Установлено, что ориентация образцов по отношению к силовым линиям Земного магнитного поля влияет на коррозионный износ (рис.18).



Рис.18 – Зависимость  $p - H$

Большому коррозионному износу подвержены образцы, поверхности которых параллельны силовым линиям МП Земли. Эффект влияния более значителен в МП с большей напряженностью.

#### Л и т е р а т у р а

1. Якупов Н.М., Галимов Ш.К., Хисматуллин Н.И. От каменных глыб к тонкостенным конструкциям. Казань: Изд-во "SOS", 2001. 96с.
2. Якупов Н.М. Строительные конструкции: этапы и перспективы развития. Учебное пособие. Казань, КГАСУ, 2006. 154 с.
3. Якупов Н.М. Механика: проблема – идея – практика. Казань: Казан. гос. ун-т, 2010. 161 с.
4. Муштары Х.М. // Известия физико-математического общества и НИИ математики и механики при Казанском университете. Сер. 3. 1938. Т.11.С.71-150.
5. Муштары Х.М., Галимов К.З. Нелинейная теория упругих оболочек. Казань: Таткнигоиздат, 1957. 431 с.
6. Kh.M. Mushtari, K.Z. Galimov. Non-linear Theory of thin elastic Shells. Academy of Sciences, USSR Kazanl Branch Tatknigoizdat. Editors and Publishers and Technical Literature. Kazan. 1957. 374 p.
7. Муштары Х.М. Нелинейная теория оболочек. М.: Наука, 1990. 223 с.
8. Галимов К.З. Основы нелинейной теории тонких оболочек. Изд-во КГУ. Казань, 1975. 326 с.
9. Галимов Н.К. // Сб. Нелинейная теория пластин и оболочек. Изд-во КГУ. Казань, 1962. С.61-95.
10. Галимов Н.К. // Прикладная механика. Т.I. В.1. 1965. С.77-85.
11. Галимов Н.К. // Прикладная механика. Т.II. В.11. 1966. С.25-30.
12. Якупов Н.М. // Исследования по теории оболочек: Тр. семинара. В.25. КФТИ КФАН СССР, 1990. С.43-55.
13. Ганеева М.С., Якупов Н.М. // Обзоры исследований по механике сплошной среды. К 50-ю КНЦ РАН, Казань, КНЦ РАН, 1995. С.7-46.
14. Ильгамов М.А. Профессор Х.М. Муштары. М.: Наука, 2001. 192 с.
15. Якупов Н.М. Лаборатория нелинейной механики оболочек: история и разработки последних лет. ИММ КазНЦ РАН, Казань, Изд-во КГУ, 2006. 98 с.
16. Корнишин М.С. Нелинейные задачи теории пластин и пологих оболочек и методы их решения. М.: Наука, 1964. 192 с.
17. Корнишин М.С., Исанбаева Ф.С. Гибкие пластины и панели. М.: Наука, 1968. 260 с.
18. Корнишин М.С., Паймушин В.Н., Снигирев В.Ф. Вычислительная геометрия в задачах механики оболочек. М.: Наука, 1989. 208 с.
19. Голованов А.И., Корнишин М.С. Введение в метод конечных элементов статики тонких оболочек. КФТИ, Казань, 1990. 269 с.
20. Свирский И.В. Методы типа Бубнова-Галеркина и последовательных приближений. М.: Наука, 1968. 199 с.
21. Ильгамов М.А. Колебания упругих оболочек, содержащих жидкость и газ. М.: Наука, 1969. 182 с.
22. Терегулов И.Г. Изгиб и устойчивость тонких пластин и оболочек при ползучести. М.: Наука, 1969. 208 с.
23. Якупов Н.М., Серазутдинов М.Н. Расчет упругих тонкостенных конструкций сложной геометрии. ИММ РАН. Казань, 1993. 207с.
24. Якупов Н.М. Прикладные задачи механики упругих тонкостенных конструкций. ИММ КНЦ РАН, Казань, 1994. 124с.

25. Якупов Н.М., Хисматуллин Н.И. Механика Нижнекамскнефтехима. Казань, 1996. 224 с.
26. Низамов Х.Н., Сидоренко С.Н., Якупов Н.М. Прогнозирование и предупреждение коррозионного разрушения конструкций. М.: Изд. РУДН, 2006. 355 с.
27. Сидоренко С.Н., Якупов Н.М. Коррозия – союзник аварий и катастроф. Монография. М.: Изд-во РУДН, 2002. 93с.
28. Якупов Н.М., Якупов С.Н. Методы расчета пленочных элементов конструкций: Учебное пособие. КГАСУ. Казань, 2007. 117 с.
29. Безопасность производственных объектов. *Науч. ред. д.т.н. Якупов Н.М.* КазНЦ РАН, МЧС РТ. 106 с.
30. Корнишин М.С., Якупов Н.М. Метод и программа расчета на ЭВМ ЕС двусвязных пластин со сложным контуром. Методические рекомендации. Расчет и испытания на прочность. МР 164-85. ГОССТАНДАРТ. Москва. 24 с.
31. Якупов Н.М., Гатауллин И.Н., Хисматуллин Р.Н. Обследование, анализ и прогнозирование долговечности строительных конструкций и рекомендации по их восстановлению. Методическое руководство. Казань, 1996. 208 с.
32. 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. 260 с.
33. Корнишин М.С., Якупов Н.М. // Прикладная механика. 1987. Т.23. № 3. С.38-44.
34. Корнишин М.С., Якупов Н.М. // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Горький, 1988. С.74-80.
35. Корнишин М.С., Якупов Н.М. // Прикладная механика. 1989. Т.25. № 8. С.53-60.
36. Якупов Н.М., Хисматуллин Н.И. // SOS, Казань, 1997, в.1. С.26-32.
37. Гатауллин И.Н., Якупов Н.М., Чайковский В.Г. // Вест. КГТУ, 4, Казань, 1997. С.12-14.
38. Низамов Х.Н., Якупов Н.М., Спиридонов С.В., Тагасов В.И. // SOS, Казань, 1998, в.2. С.27-30.
39. Якупов Н.М., Гатауллин И.Н., Хисматуллин Р.Н. // SOS, Казань, 1998, вып.2. С.53-56.
40. Якупов Н.М., Хисматуллин Н.И. // SOS, Казань, 1999, вып.3. С.34-36.
41. Якупов Н.М., Галимов Н.К., Леонтьев А.А. // Механика композиционных материалов и конструкций. 2000. Т.6, №2. С.238-243.
42. Якупов Н.М., Галимов Ш.К., Хисматуллин Н.И. // SOS, 2000, в.4. С.33-38.
43. Якупов Н.М., Галимов Н.К., Леонтьев А.А., Нургалиев А.Р. // Двойные технологии, 2001, №4. С.60-64.
44. Якупов Н.М., Галявиев Ш.Ш. Метод исследования напряженно-деформированного состояния тонкостенных конструкций сложной геометрии // Двойные технологии, 2001, №4. С.56-59.
45. Якупов Н.М., Галявиев Ш.Ш. // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2001. №8-9. С.32-37.
46. Якупов Н.М., Киямов Х.Г., Галявиев Ш.Ш., Хисамов Р.З. // Строительство. Изв. ВУЗов. №8 (524), 2002. С.14-18.
47. Якупов Н.М., Галимов Н.К., Нургалиев А.Р. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. Вып.1, 2002. С.32-36.
48. Якупов Н.М., Галявиев Ш.Ш., Хисамов Р.З. // Вестник РУДН. Инженерные исследования. В.1, 2002. С. 27-31.
49. Якупов Н.М., Ахмадиев Ф.Г. и др. // Известия КГАСА, 2003, №1. С.39-41.
50. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г. // Вестник машиностроения, № 5. С.83-86.
51. Якупов Н.М., Галявиев Ш.Ш., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н. // Проблемы энергетики, 2006, №7-8. С.36-42.
52. Якупов Н.М. // Известия КГАСУ. №1 (7) / 2007. С.52-55.
53. Якупов Н.М., Нургалиев А.Р. // Известия КГАСУ. №1 (7) / 2007. С.56-59.
54. Якупов Н.М., Киямов Х.Г., Киямов И.Х., Якупов С.Н. // Известия КГАСУ. №1 (7) / 2007. С.35-42.
55. Якупов Н.М., Абдюшев А.А. // Известия КГАСУ. №2 (8) / 2007. С.61-64.
56. Якупов Н.М., Куприянов В.Н., Якупов С.Н. // Рос. акад. архитектуры и строительных наук: Вест. отдел. строит. наук. Период. науч. издание. В.12. Белгород, 2008. С.301-310.

57. Якупов Н.М., Нургалиев А.Р. // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. №3, 2008. С.14-18.
58. Якупов Н.М., Куприянов В.Н., Якупов С.Н. // Известия КГАСУ. №1/2008. С.106-112.
59. Якупов Н.М., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Т.74. №11, 2008. С.54-56.
60. Yakupov N.M., Nurgaliev A.R., Yakupov S.N. // Factory laboratory. Diagnosis materials. 2008. T.74. №11. P.54-56.
61. Якупов Н.М., Якупов С.Н. // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. №1, 2009. С.60-70.
62. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Якупов С.Н. // Вест. машиностр. 2009. №6. С.44-47.
63. Якупов Н.М., Абдюшев А.А. // Известия КазГАСУ. 2009, №2 (12). С.147-151.
64. Yakupov N.M., Nurullin R.G., Yakupov S.N. // Russian Engineering Research. 2010. Vol.29. No.6. P.571-574.
65. Якупов Н.М. // Строительная механика инженер. констр. и сооруж. №3. 2010. С.24-37.
66. Якупов Н.М. // Известия КГАСУ, 2010. №1 (13). С.5-15.
67. Абдюшев А.А., Якупов Н.М. // Вест. КГТУ. №4, 2010. С.5-9.
68. Якупов С.Н. // Механика композ. материалов и констр., 2010, т.16, №3. С.436-444.
69. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н. // Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 20-летию ИММ КазНЦ РАН. Казань: Фолиант, 2011. Т.2. С.213-224.
70. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р. // Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 20-летию ИММ КазНЦ РАН. Казань: Фолиант, 2011. Т.2. С.203-212.
71. Якупов Н.М., Киямов Х.Г., Якупов С.Н., Киямов И.Х. // Механика композиционных материалов и конструкций. 2011. Том 17, №1. С.145-154.
72. Галимов Н.К., Якупов Н.М., Якупов С.Н. // Механика твердого тела, №3, 2011. С.58-66.
73. Galitov N.K., Yakupov N.M., Yakupov S.N. // МТТ, №3, 2011. р.58-66.
74. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р. // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. №3, 2011. С.74-79.
75. Якупов Н.М., Абдюшев А.А., Якупов С.Н. и др. // Коррозия «Территория «НЕФТЕ-ГАЗ» №1 (18), 2011. С.68-71.
76. Якупов Н.М., Абдюшев А.А., Якупов С.Н. // Вестник Нижегородского ун-та им. Лобачевского. 2011. №4, ч.4. С.1894-1896.
77. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н. // ДАН, 2012, том 443, № 2, с.173-175.
78. Yakupov N.M., Giniyatullin R.R., Yakupov S.N. // Doklady Physics, 2012, V.57, 3, pp.104-106.
79. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н. // Пробл. прочности, 2012, №2. С.76-84.
80. Yakupov N.M., Giniyatullin R.R., Yakupov S.N. // STRENGTH OF MATERIALS, 2012, 170-176.
81. Кантюков Р.А., Якупов Н.М., Тамеев И.М., Якупов С.Н., Кантюков Р.Р. // Газовая промышленность. 2012. №9. С.14-18.
82. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н. // ДАН, 2012, т.446, № 6, с.624-626.
83. Yakupov N.M., Giniyatullin R.R., Yakupov S.N. // Doklady Physics, 2012, Vol. 57, No. 10, pp. 393-395.
84. Якупов Н.М., Нургалиев А.Р., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н. // Вестник машиностроения, №10. 2012. С.36-40.
85. Yakupov N.M., Nurgaliev A.R., Giniyatullin R.R., Yakupov S.N. // Russian Engineering Research, 2013, Vol.33, No.2, pp. 69-73.
86. Кантюков Р.А., Якупов Н.М., Тамеев И.М., Киямов Х.Г., Якупов С.Н., Кантюков Р.Р. // Наука и техника в газовой промышленности. №2, 2012. С.53-60.
87. Кантюков Р.А., Якупов Н.М., Тамеев И.М., Якупов С.Н., Кантюков Р.Р. // Газовая промышленность. Приложение, 2013. С.11-15.
88. Кантюков Р.А., Якупов Н.М., Тамеев И.М., Киямов Х.Г., Якупов С.Н., Кантюков Р.Р. // Газовая промышленность. №7, 2013. С.28-30.
89. Якупов С.Н., Киямов И.Х. // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, №2, 2014. С.76-80.
90. Кантюков Р.А., Якупов Н.М., Велиюлин И.И., Тамеев И.М., Якупов С.Н., Кантюков Р.Р. // Наука и техника в газовой промышленности. №1 (57), 2014. С.68-75.

91. Харисламова Л.У., Якупов С.Н. // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, №6. 2014. С.65-70.
92. Кантюков Р.А., Якупов Н.М., Тамеев И.М., Якупов С.Н., Абдюшев А.А. Кантюков Р.Р. // Газовая промышленность: 2, 2015. С. 60-62.
93. Галимов Н.К. // Строительная механика инженер. констр. и сооруж. №2, 2015. С.28-32.
94. Велюлин И.И., Кантюков Р.А., Якупов Н.М., Тамеев И.М., Якупов С.Н., Кантюков Р.Р. Гиниятуллин Р.Р., Нургалиев А.Р. // Наука и техника в газ. пром., 1, 2015. С.45-50.
95. Велюлин И.И., Кантюков Р.А., Якупов Н.М., Тамеев И.М., Якупов С.Н., Кантюков Р.Р. Гиниятуллин Р.Р., Нургалиев А.Р. // Наука и техника в газ. пром., 1, 2015. С.57-67.
96. Якупов Н.М. // Строит. механика инженерных констр. и сооруж., 2015, №4. С.3-15.
97. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н. // ДАН, 2015. Т.463, №6. С.684-686.
98. Yakupov N.M., Giniyatullin R.R., Yakupov S.N. // Doklady Physical Chemistry, 2015, Vol. 463, Part 2. P.188-190.
99. Krivoschapko S.N., Ivanov V.N. Encyclopedia of Analytical Surfaces. Springer International Publishing Switzerland, 2015. 752 p.
100. Якупов Н.М. // Исследования по теории оболочек. Труды семинара. Казань: КФТИ КФАН СССР, 1984. Вып.17. Ч.П. С.4-17.
101. Якупов Н.М., Галляев Ш.Ш., Хисамов Р.З. // Актуальные проблемы механики сплошной среды. Казань: ИММ КазНЦ РАН, 2001. С.147-158.
102. Якупов Н.М., Киямов Х.Г., Киямов И.Х., Якупов С.Н. // Известия КГАСУ. №1 (7) / 2007. С.35-42.
103. Якупов Н.М., Нургалиев А.Р., Нуруллин Р.Г., Якупов С.Н. // IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Н. Новгород. Изд-во Нижегородского государственного университета. Нижний Новгород. 2006. С.160-161.
104. Якупов Н.М., Сагадеев Р.Г. // Тр. семинара. В.21. Ч.1. Казань, 1988. С.138-143.
105. Yakupov N.M. // Research in hypersonic flows and hypersonic technologies, TsAGI. 1994. Section 7. Strength of hypersonic vehicles. P.44-47.
106. Якупов Н.М., Киямов Х.Г., Якупов С.Н. и др. // Математические методы в технике и технологиях. ММТТ-20. Сборник трудов. Т.4. Сек.5. Ярославль, изд-во Ярославский гос. технический университет, 2007. С.21-24.
107. Якупов С.Н., Якупов Н.М. Влияние царапин на характеристики жесткости тонкостенных образцов // Обратные краевые задачи и их приложения: мат. конф. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2014. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
108. Якупов С.Н., Якупов Н.М. // Межд. науч. чтения И.А. Одингга, 2014. М.: ИМЕТ. С.343-345.
109. Якупов С.Н., Якупов Н.М. // Механика наноструктурированных материалов и систем. Сб. тр. 2-й Всерос. конф. (17-19 дек. 2013 г., Москва). Т.1, М., 2014. С.112-121.

## MECHANICS OF THIN-WALLED STRUCTURES: HISTORY, DIAGNOSTICS

N.M. YAKUPOV

*Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Science Center,  
Russian Academy of Sciences*

Skins, possessing unique properties, are widely used in all industries. They take heavy loads, work in harsh environments and are exposed to the physical fields. It is necessary to assess the carrying capacity of thin-walled structures, taking into account the influence of fields and environments, as well as on the basis of revised relations theory of shells. The fragments of the history of the birth of the nonlinear theory of shells and membranes, a method of evaluating the mechanical properties and the evaluation approach of stress concentration in thin-walled elements of designs of complex structures. There have been new results on the effects of corrosion.

**Keywords:** shell, thin-walled structures, the stress-strain state, the load, the environment and physical fields, magnetic field, corrosion, surface defects, mechanical properties, corrosion wear model, stress concentration, diagnosis