



УДК 539.3

Н.М. Якупов – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией нелинейной механики оболочек Института механики и машиностроения Казанского научного центра Российской академии наук

В.Н. Куприянов – доктор технических наук, профессор, ректор КазГАСУ

С.Н. Якупов – магистр

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)

Институт механики и машиностроения Казанского научного центра Российской академии наук (ИММ КазНЦ РАН)

К ИССЛЕДОВАНИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛЕНОК И ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

АННОТАЦИЯ

Изложен подход к исследованию механических характеристик тонких композиций, имеющих неоднородную структуру, дефекты и повреждения. Полимерные материалы чувствительны к воздействию различных факторов. Рассмотрены вопросы изменения механических характеристик полимерных пленок с белыми и черными подложками под действием солнечного излучения. При этом учитывается эффект влияния толщины снежного покрова над пленкой. Для исследования используется экспериментально-теоретический метод. Проведен анализ результатов и сделаны выводы.

N.M. Yakupov – ddoctor of technical sciences, head of Nonlinear Mechanical Engineers of Shells Laboratory of Institute Mechanical Engineers and Machine Building (Kazan Scientific Centre of Russia Academy of Sciences)

V.N. Kuprijanov – doctor the technical sciences, professor, rector KSUAE

S.N. Yakupov – candidate on Master degree

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)

Institute of Mechanical Engineers and Machine Building of Kazan Scientific Centre of Russia Academy of Sciences (IMM KSC RAS)

TO RESEARCH OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF FILMS AND FILM STRUCTURES

ABSTRACT

The approach of research of mechanical characteristics of the thin compositions having non-uniform structure, defects and damages is stated. Polymeric materials are sensitive to influence of various factors. Changes in mechanical characteristics of polymeric films with white and black substrates under sunlight radiation are considered. The influence of snow cover thickness above the film is taken into account. In this research the experimental and theoretical method is used. Analysis of the results is made and conclusions are drawn.

О роли пленок и подходах к исследованию их механических характеристик. Если в классификации этапов развития элементов конструкций XX век был веком тонкостенных конструкций, то XXI век станет, несомненно, веком пленок и мембран [1-3]. В настоящее время получают широкое распространение тонкие пленки и их композиции, обладающие высокими механическими характеристиками. Уникальными характеристиками обладают наноструктуры, нанопленки. По данным, приведенным в работе [4], сопротивление материала упругой деформации (модуль Юнга) для углеродных нанотрубок составляет:

1,02 ТПа (Робертсон), 1,07 ТПа (Якобсон), 1,5 ТПа (Оверни). Для справки: модуль Юнга стали – 0,2 ТПа. Наноструктуры выдерживают большие деформации растяжения (до 40%), не проявляя признаков разрыва. Бездефектные углеродные трубки на два порядка прочнее стали и приблизительно в четыре раза легче ее.

В зависимости от структуры материала, от взаимного расположения и сочетания различных элементов композиций механические свойства могут существенно меняться. Сложная структура материала пленок возникает при их износе под воздействием окружающей среды, излучения, напыления и т.д.



Сложная структура материала бывает запланированной для получения необходимых функциональных качеств материала. В качестве примера пленок со сложной структурой можно отметить, в частности: пленки со сквозными и несквозными распределенными отверстиями; пленки с дефектами в виде различных трещин, царапин, возникающими либо в процессе их производства, либо в процессе эксплуатации; пленки с различными инородными включениями и порами; многослойные и армированные пленочные композиции с индивидуальными свойствами слоев и волокон, включая пленки с укладкой элементов композиций по сложному закону.

Трудно, а порой и невозможно, даже описать сложную структуру материала и сложные формы дефектов, не говоря уже об определении их действительных физико-механических свойств. При исследовании механических характеристик пленок традиционным стандартным способом одноосного растяжения образцов получается большой разброс результатов испытаний, это, в частности, отмечается и в работе [5]. Невозможно исследовать стандартным одноосным способом пленочные структуры, имеющие пространственно-неоднородную структуру, дефекты и повреждения. Работы, посвященные изучению пленок со сложной структурой и с различными дефектами, в двумерной постановке встречаются редко. Можно выделить два подхода оценки прочности тонких композиций:

- подход раздельного исследования свойств и взаимодействие составных частей неоднородной структуры (подход сложен и малоэффективен);

- подход определения интегральных характеристик всего пакета композиции, как «материал – конструкция».

Экспериментально-теоретический метод.

Проблема определения механических характеристик пленок и пленочных композиций неоднородной структуры весьма актуальна. Эффективным подходом исследования таких объектов является подход, основанный на синтезе эксперимента и теории [6 - 12].

На экспериментальном этапе на установке ДМ-1 (рис.1) круглый образец (рис.2) без подложки или с подложкой (при наличии сквозных дефектов) зажимается по контуру и нагружается поверхностным давлением. При этом производится мониторинг формы купола, то есть определяется прогиб в заданных точках:

$$w(r, q) = f(p).$$

В случае равномерного распределения неоднородностей достаточно производить замеры прогиба в вершине купола:

$$H_{(r=0)} = f(p).$$

Разработанная экспериментальная установка ДМ-1 внедрена в научно-исследовательскую практику ИММ КазНЦ РАН.

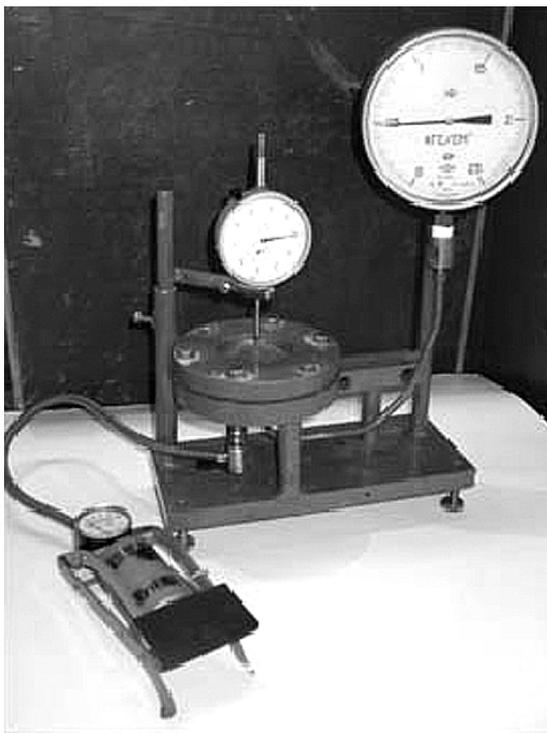


Рис. 1. Экспериментальная установка ДМ-1

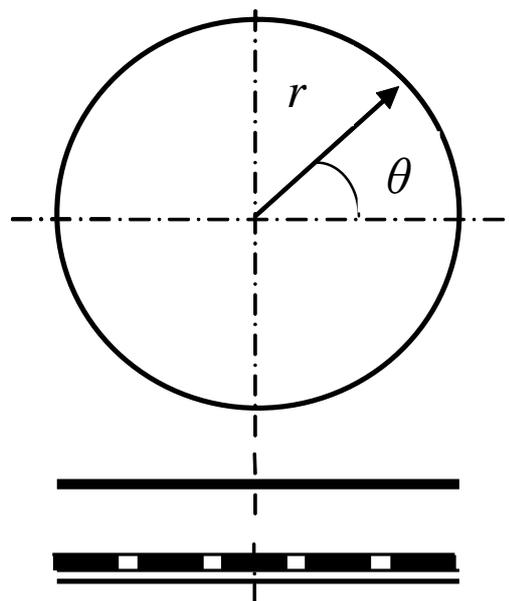


Рис. 2. Круглый образец без и с подложкой



Значения коэффициентов N для прогибов

Согласующий коэффициент	Коэффициент Пуассона n материала			
	0,25	0,3	0,4	0,5
N	0,31148	0,30367	0,29016	0,27905

На этапе теоретической обработки экспериментальных результатов используются, в частности, соотношения для гибких упругих мембран, гибких упругих мембран при больших изменениях кривизны, гибких мембран при пластических деформациях.

Для упругих материалов в случае равномерного распределения неоднородностей механические характеристики вычисляют и оценивают по значениям модуля упругости, например, по формуле [13]:

$$E = \frac{NpD^4(1-n^2)}{16H^3h},$$

где E – модуль упругости материала тонкой пленки или нанопленки; N – согласующий коэффициент; p – равномерно распределенное давление; D – диаметр рабочей части образца; n – коэффициент Пуассона материала; h – первоначальная толщина пленки; H – высота подъема купола (прогиб в центре образца). При этом коэффициент N выбирают в пределах от 0,28 до 0,32 в зависимости от величины коэффициента Пуассона n материала пленки. Конкретные значения коэффициента N в зависимости от коэффициента n приведены в таблице 1 (для промежуточных значений n величины коэффициента N получают путем интерполяции).

Для пластичных материалов в случае равномерного распределения неоднородностей механические характеристики оценивают по условному модулю $E_{усл}$ упругости, например, по формуле, полученной на основе нелинейной теории тонких оболочек при больших перемещениях и деформациях и соотношений теории пластичности [6, 10]:

$$E_{усл} = Ake_i^{k-1}, \quad A = \frac{3^{k+1}pD}{2^{k+4}Jh_0},$$

где $E_{усл}$ – условный модуль упругости материала пленки; A – параметр, свойственный для конкретного материала; k – коэффициент, характерный для данного материала ($0 \leq k \leq 1$); e_i – интенсивность деформаций; J – вспомогательный параметр, зависящий от деформаций в материале, высоты подъема купола мембраны H и коэффициента k ; h_0 – исходная толщина образца.

При испытании пленок, имеющих сквозные дефекты или несплошную структуру, применяют подложку (рис. 2) из сплошной бездефектной пленки, имеющей более высокую деформационную способность по сравнению с испытуемым материалом. При этом модуль упругости материала пленки с дефектами определяется по формуле:

$$E_m = \frac{E_g(h_m + h_n) - E_n h_n}{h_m}$$

где E_m , E_n , E_g – модули упругости или условные модули упругости (величины, характеризующие механические свойства) материала образца, подложки и пакета в целом, соответственно; h_m , h_n – толщины материала образца и подложки.

Примеры исследования. На базе экспериментально-теоретического подхода проведен цикл исследований по изучению изменения механических характеристик полимерных пленок. Исследовано влияние цвета подложки на свойства пленок под действием солнечного излучения в летнее и зимнее время, влияние толщины снежного покрова над пленкой на механические свойства материала и другие. Рассмотрены полимерные пленки толщиной 30 мкм с белыми и черными подложками с высотой снежного покрова в исходный момент, равный 2 и 4 см.

Ниже приведены результаты исследования влияния солнечного излучения в ранневесенний период на механические характеристики полимерных пленок с подложками снизу и снежным покровом сверху. Образцы выдерживались на открытом воздухе в период с 4 марта по 21 марта 2008 года. Особенностью рассматриваемого периода является то, что снежный покров днем частично таял, а ночью образовавшаяся вода превращалась в лед. Кроме того, регулярно шел мокрый снег и дождь. Данные о погодном режиме в рассматриваемый период приведены в таблице 2.

На рис. 3-4 приведены зависимости «прогиб H – давление p » в вершине купола образцов, соответственно с белой и черной подложкой, подверженных солнечному излучению в течение 9 дней. Из этих рисунков видно, что образцы с черной подложкой чувствительны на толщину снежного покрова, то есть с уменьшением толщины снежного покрова прогибы при одинаковых давлениях



Таблица 2

Погодные данные

Дата, март 2008 года	Средняя температура, °С		Осадки	Влажность, %
	ночью	днем		
4	0	+1	Мокрый снег	85
5	-3	-1	Мокрый снег	85
6	-2	-3	Снег, слабая метель	85
7	-6	-1	Мокрый снег	65
8	-2	+2	Мокрый снег, дождь	75
9	-8	-3	Снег	85
10	-10	-2	Солнечно, ясно	80
11	-11	-3	Солнечно, ясно	90
12	-11	-1	Солнечно, ясно	93
13	-5	+1	Мокрый снег, дождь	85
14	-4	+2	Без осадков	94
15	0	+3	Без осадков	90
16	-2	+1	Солнечно, ясно	95
17	0	+1	Мокрый снег	90
18	0	+3	Мокрый снег	88
19	-2	+4	Солнечно, ясно	93
20	+1	+3	Мокрый снег, дождь	96
21	-3	+2	Мокрый снег	90

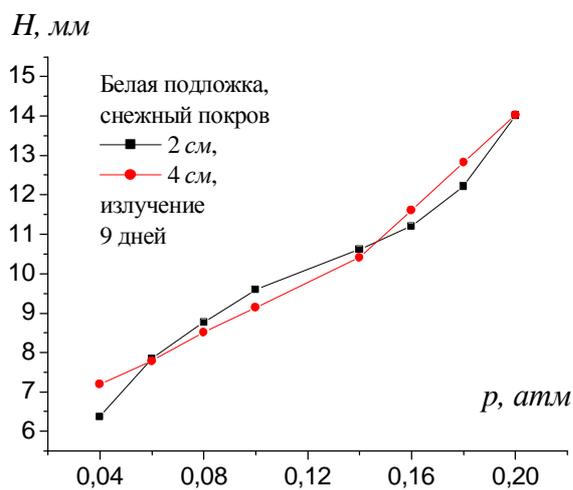


Рис. 3

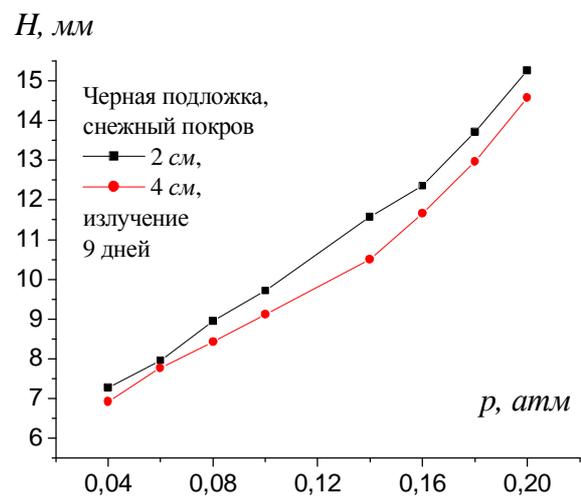


Рис. 4

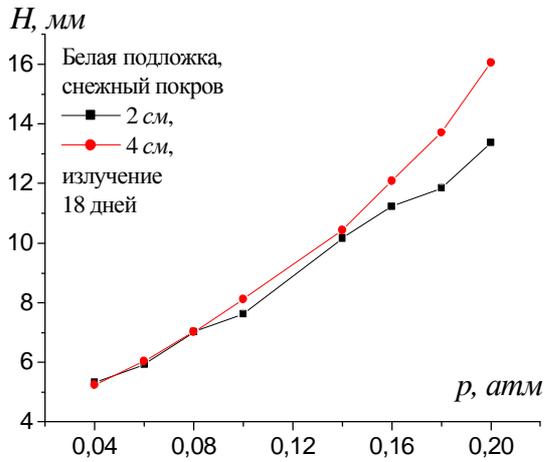


Рис. 5

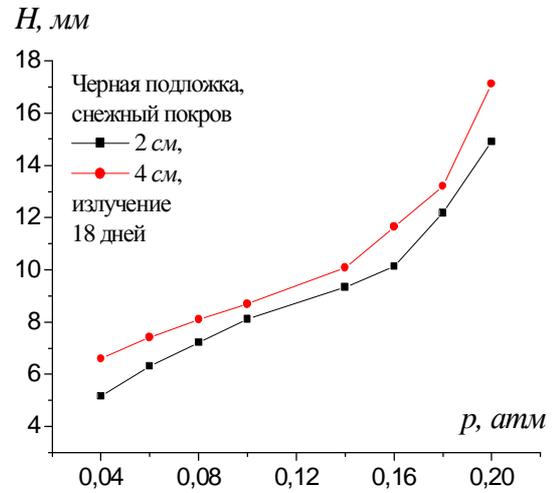


Рис. 6

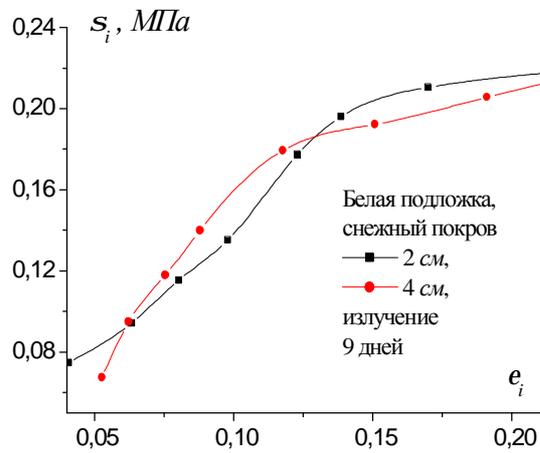


Рис. 7

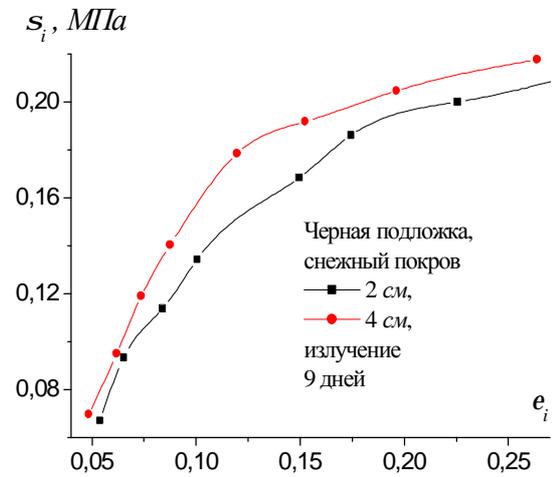


Рис. 8

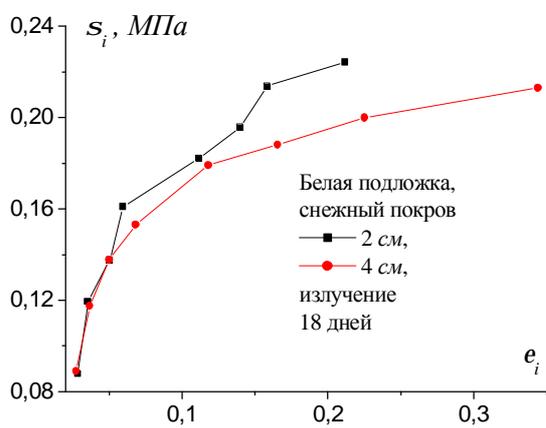


Рис. 9

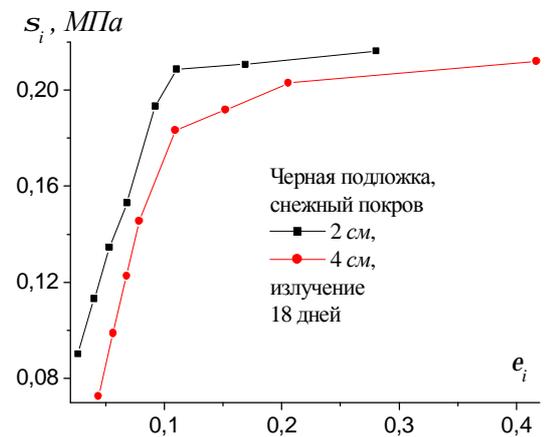


Рис. 10



возрастают. Другими словами снежный покров для пленок с черными подложками является относительно эффективной защитой от солнечного излучения.

На рис. 5-6 приведены зависимости «прогиб H – давление p » в вершине купола образцов, соответственно с белой и черной подкладкой, подверженных солнечному излучению в течение 18 дней. Из этих рисунков видно, что образцы с черной подложкой также чувствительны на толщину снежного покрова. Однако эффект получается обратным по сравнению с 9 днями облучения: с увеличением толщины снежного покрова прогибы при одинаковых давлениях возрастают. Этот эффект, возможно, можно объяснить образованием слоя льда в ночное время – чем дольше по времени образец испытывается, тем толще слой льда образуется над образцом.

В целом можно отметить, что белая подложка способствует относительной стабильности механических характеристик испытываемых пленок от воздействия солнечного облучения.

Зависимость «интенсивность напряжений S_i – интенсивность деформаций e_i » для образцов с белой и черной подложками, подверженных солнечному излучению в течение 9 дней, приведены на рис. 7-8. Соответствующие кривые для образцов, подверженных солнечному излучению в течение 18 дней, представлены на рис. 9-10. Из рис. 7-8 видно, что образцы с черной подложкой, подверженные солнечному излучению в течение 9 дней, с увеличением толщины снежного покрова выдерживают более высокие напряжения. Однако, как видно из рис. 9-10, с увеличением времени воздействия излучению до 18 дней эффект получается обратным по сравнению с 9 днями облучения – образцы с меньшей толщиной снежного покрова выдерживают более высокие напряжения. Этот эффект, как и ранее отмечалось, можно объяснить образованием слоя льда в ночное время.

Выводы:

1. На изменения механических характеристик от солнечного излучения оказывают влияние: толщина снежного покрова над пленкой, цвет подложки под пленкой, а также изменение температуры окружающей среды.

2. При этом пленка с белой подложкой менее чувствительна на толщину снежного покрова.

3. Появление между пленкой и снежным покровом водного слоя и слоя льда изменяют механические характеристики пленки при воздействии солнечного излучения.

4. Экспериментально-теоретический метод позволяет улавливать тонкие процессы, происходящие в материале.

Заключение

1. Разрабатываемый экспериментально-теоретический метод может стать незаменимым

инструментом при исследовании механических характеристик различных тонких и очень тонких пленок и композиций, имеющих неоднородную структуру и различные дефекты.

2. Разрабатываемый экспериментально-теоретический метод в двумерной постановке необходимо стандартизовать взамен одноосного испытания полосок образцов.

3. Разработка в составе комплексной разработки включена в Отчет РАН за 2006 год [14], а также награждена Серебряной медалью и Дипломом на 35-ом Международном Салоне «Женева-2007» [15].

Работа выполняется в рамках программы фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН “Развитие механики многомасштабного (от нано- к макромасштабам) деформирования и разрушения как основы проектирования новых материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками” (координатор – академик РАН Н.Ф. Морозов).

Литература

1. Якупов Н.М., Галимов Ш.К., Хисматуллин Н.И. От каменных глыб к тонкостенным конструкциям. – Казань: Изд-во SOS, 2001. – 96 с.
2. Якупов Н.М. Строительные конструкции: этапы и перспективы развития. Учебное пособие. / Под ред. проф. Сучкова В.Н. – Казань: КГАСУ, ИММ КазНЦ РАН, 2006. – 154 с.
3. Якупов Н.М., Якупов С.Н. Методы расчета пленочных элементов конструкций: Учебное пособие. / Под ред. проф. Сучкова В.Н. – Казань: КГАСУ, 2007. – 117 с.
4. Гольдштейн Р.В., Ченцов А.В. Дискретно-континуальная модель деформирования нанотрубок. ИПМ РАН. Препринт №739. – М., 2003. – 67 с.
5. Куприянов В.Н. Пленочно-тканевые материалы для строительных конструкций. – Казань: КИСИ, 1989. – 94 с.
6. 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.
7. Якупов С.Н., Нуруллин Р.Г., Шафигуллин 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. – Саратов: Изд-во Сарат. гос.техн.ун-та, 2005. – С. 249-251.
8. Якупов Н.М., Галявиев Ш.Ш., Нурғалиев А.Р., Якупов С.Н. Состояние конструкций градилен и предотвращение их разрушения. // Проблемы энергетики, 2006, № 7-8. – С. 36-42.
9. Нурғалиев А.Р., Нуруллин Р.Г., Якупов Н.М., Якупов С.Н. Предотвращение разрушения



- строительных конструкций крупногабаритной градирни СК-1200 // IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. – Н. Новгород: Изд-во Нижегородского гос. ун-та, 2006. – С. 160-161.
10. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Галимов Н.К., Галявиев Ш.Ш. Способ определения прочностных свойств пленочных материалов: Патент № 2184361 РФ на изобретение.
 11. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н. Способ определения прочностных свойств тонкослойных материалов. Патент № 2310184 РФ на изобретение.
 12. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н. Способ испытаний образцов металлических мембран под напряжением и устройство для его осуществления: Патент № 2296976 РФ на изобретение.
 13. Галимов Н.К., Нуруллин Р.Г., Леонтьев А.А. Об упругом равновесии защемленных круглых мембран под действием равномерного давления // Актуальные проблемы механики сплошной среды. ИММ КазНЦ РАН. – Казань: Изд-во КГУ, 2004. – С. 129-139.
 14. Отчет о деятельности Российской академии наук в 2006 году. Основные результаты в области естественных, технических, гуманитарных и общественных наук. Механика. – М.: Наука, 2007. – С. 62.
 15. Jakupov Nuch et alea – RUSSIE Determination des caracteristiques mecaniques des membranes et des films defectueux et leur utilisation // 35 SALON INTERNATIONAL DES INVENTIONS, DES TECHNIQUES ET PRODUITS NOUVEAUX DE GENEVE, 2007. – P. 99, 101.