

ТЕОРИЯ ТОНКИХ ОБОЛОЧЕК THEORY OF THIN SHELLS


DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-6-576-587
УДК 531:539

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Диагностика тонкостенных конструкций сложной геометрии и структуры

Н.М. Якупов  , С.Н. Якупов 

Казанский научный центр РАН, Казань, Российская Федерация

 yzsrr@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 12 сентября 2021 г.

Доработана: 5 ноября 2021 г.

Принята к публикации: 15 ноября 2021 г.

Аннотация. Приведены основные этапы рождения тонкостенных конструкций, изменения их относительной толщины и массы единичной площади; указаны пути создания совершенных тонкостенных конструкций. Отмечены проблемы, возникающие в процессе эксплуатации тонкостенных конструкций сложной геометрии, а также подходы и методы их расчета. Для обеспечения безаварийной работы тонкостенной конструкции с тонкослойным покрытием, находящейся под нагрузкой и испытывающей воздействие физических полей и сред, необходимо грамотно диагностировать состояния элементов конструкций. Отмечается сплайновый вариант метода конечных элементов в двумерной (СВ МКЭ-2) и трехмерной (СВ МКЭ-3) постановках, а также синтез этих вариантов – СВ МКЭ-2 + СВ МКЭ-3. Сочетание идеи параметризации всей области и аппроксимация искомого переменных в пределах элемента эрмитовыми кубическими сплайнами позволяет получать высокоточные согласованные конечные элементы. Разработанные варианты метода конечных элементов дают возможность оценивать напряженно-деформированное состояние конструкций сложной геометрии, в том числе расчет многослойных, тонкостенных конструкций с покрытием и локальными дефектами, а также учитывать специфические поверхностные свойства, отличные от свойств основного массива. Рассматриваются исследования концентрации напряжений около локальных углублений. Отмечаются двумерные экспериментально-теоретические методы оценки жесткостных свойств и адгезии тонкостенных, тонкослойных и композиционных элементов конструкций сложной структуры, которые наряду с распределенной сложной структурой могут иметь распределенные дефекты. Разработки использованы при решении конкретных задач ряда предприятий.

Ключевые слова: тонкостенные конструкции, сложная геометрия, сложная структура, защитное покрытие, адгезия, история рождения, физические поля, среда, диагностика состояния, подходы расчета, сплайновый вариант, метод конечных элементов, экспериментально-теоретический метод, жесткостные характеристики

Для цитирования

Якупов Н.М., Якупов С.Н. Диагностика тонкостенных конструкций сложной геометрии и структуры // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 6. С. 576–587. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-6-576-587>

Якупов Нух Махмудович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт механики и машиностроения, Казанский научный центр, Российская академия наук, Российская Федерация, 420111, Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31; ORCID: 0000-0001-8248-1589, eLIBRARY SPIN-код: 2933-5615, Scopus Author ID: 6508072220; yzsrr@mail.ru

Якупов Самат Нухович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт механики и машиностроения, Казанский научный центр, Российская академия наук, Российская Федерация, 420111, Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31; ORCID: 0000-0003-0047-3679, eLIBRARY SPIN-code: 7382-4759, Scopus Author ID: 26968046600; tamas_86@mail.ru

© Якупов Н.М., Якупов С.Н., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Diagnostics of thin-walled structures of complex geometry and structure

Nukh M. Yakupov  , Samat N. Yakupov 

Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Kazan, Russian Federation

✉ yzsrr@mail.ru

Article history

Received: September 12, 2021

Revised: November 5, 2021

Accepted: November 15, 2021

Abstract. The main stages of the birth of thin-walled structures, changes in their relative thickness and mass of a unit area are given; ways of creating perfect thin-walled structures are indicated. The problems arising during the operation of thin-walled structures of complex geometry, as well as approaches and methods of their calculation are noted. To ensure trouble-free operation of a thin-walled structure with a thin-layer coating, under load and exposed to physical fields and environments, it is necessary to correctly diagnose the condition of structural elements. The spline variant of the finite element method in two-dimensional (SV FEM-2) and three-dimensional (SV FEM-3) productions is noted, as well as the synthesis of these variants – SV FEM-2 + SV FEM-3. The combination of the idea of parametrization of the entire domain and approximation of the desired variables within the element by Hermitian cubic splines makes it possible to obtain high-precision consistent finite elements. The developed variants of the finite element method make it possible to evaluate the stress-strain state of structures of complex geometry, including the calculation of multilayer, thin-walled structures with coating and local defects, as well as to take into account specific surface properties other than those of the main array. Studies of stress concentration near local depressions are considered. Two-dimensional experimental and theoretical methods are noted for evaluating the stiffness properties and adhesion of thin-walled, thin-layer and composite structural elements of complex structure, which, along with a distributed complex structure, may have distributed defects. The developments were used in solving specific tasks of a number of enterprises.

Keywords: thin-walled structures, complex geometry, complex structure, protective coating, adhesion, birth history, physical fields, physical environment, state diagnostics, calculation approaches, spline version, finite element method, experimental-theoretical method, stiffness characteristics

For citation

Yakupov N.M., Yakupov S.N. Diagnostics of thin-walled structures of complex geometry and structure. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(6):576–587. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-6-576-587>

Введение

Познавая окружающий мир и решая возникающие проблемы, человечество прошло большой путь развития. К началу эпохи Возрождения практически была завершена закладка фундамента многих наук, в том числе математики и механики. В частности, изобретены колесо и рычаг как основа машиностроения; кирпич, бетон и криволинейные формы как основа строительного дела; сформулирована методология познания и развита техника эксперимента; осуществлен переход на позиционную систему счисления на базе арабских цифр и на систему математических символов основы современной математики и вычислительной техники.

Современная механика бурно развивается, ей еще предстоит решить много проблем, которые ставит перед ней современное общество, прежде всего проблемы предотвращения техногенных катастроф и решение вопросов экологии, создание легких и прочных тонких структур и исследование их свойств в различных средах и физических полях и т. д.

В исследовании отмечаются наиболее важные этапы рождения тонкостенных конструкций в строительном деле: от каменных глыб до изящных тонкостенных конструкций сложной геометрии, являющихся венцом их развития. Тонкостенные конструкции, сочетающие в себе легкость с высокой прочностью, находят широкое применение в строительстве и машиностроении, в авиа- и ракетостроении, кораблестроении, нефтехимии и т. д. Исторические аспекты развития тонкостенных конструкций позволяют выявлять актуальные проблемы и направления дальнейшего их развития.

Nukh M. Yakupov, Dr.Sci. (Eng.), leading researcher, Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 2/31 Lobachevskogo St, Kazan, 420111, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8248-1589, eLIBRARY SPIN-code: 2933-5615, Scopus Author ID: 6508072220; yzsrr@mail.ru

Samat N. Yakupov, PhD in Technical Sciences, senior researcher, Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 2/31 Lobachevskogo St, Kazan, 420111, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0047-3679, eLIBRARY SPIN-code: 7382-4759, Scopus Author ID: 26968046600; tamas_86@mail.ru

Современные тонкостенные конструкции воспринимают большие нагрузки, работают в агрессивных средах, испытывают воздействие физических полей. В процессе эксплуатации в элементах конструкций возникают дефекты, в том числе коррозионные. В работе отмечаются некоторые проблемы, возникающие в процессе эксплуатации тонкостенных конструкций.

Широкому распространению тонкостенных конструкций способствовали технологические возможности, а также успешное решение научных проблем, в частности разработка теории оболочек. К 1960–1970-м гг. были разработаны эффективные методы расчета тонкостенных конструкций на базе теории оболочек. Отмечаются подходы расчета тонкостенных конструкций сложной геометрии, акцентируется внимание на сплайновом варианте метода конечных элементов (МКЭ) как эффективного метода расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочек сложной геометрии.

В настоящее время наблюдается всевозрастающее применение различных тонкостенных и тонкослойных композиций сложной структуры с уникальными физико-механическими свойствами. Вопросы определения жесткостных свойств тонких композиций сложной структуры и оценки их долговечности является чрезвычайно актуальными. В работе уделяется внимание эффективному экспериментально-теоретическому методу оценки жесткостных характеристик тонкостенных и тонкослойных конструкций сложной структуры и геометрии и адгезионных свойств различных покрытий.

Рождение тонкостенных конструкций в строительном деле

Вся деятельность человека, начиная с глубокой древности и до настоящего времени, тесно связана со строительством [1–3]. Предки из бронзовой эпохи оставили после себя композиции из массивных каменных блоков (менгиры, дольмены и кромлехи). В Древнем Египте сооружены грандиозные каменные пирамиды, строительными элементами которых были трехмерные каменные блоки и высушенные на солнце кирпичи. Древние греки использовали каменные блоки, кирпичные стены и деревянные брусья. Прорыв в строительном деле был сделан в Древнем Риме благодаря изобретению бетона, который дал возможность реализации сложных конструктивных форм. Получили развитие арочные структуры, появились большие каменные полусферические купола – пространственное развитие арок. В Византии и в исламских странах широкое распространение получили купола, опирающиеся на арки. В архитектуре исламских стран появились арки со сложным контуром, в отличие от арок полукруглой формы, используемых в Древнем Риме. Новые формы имели большую выразительность и выгодно отличались в прочностном отношении – наличие угла на вершине арки исключало возникновение зоны растяжения и увеличивало надежность конструкции при землетрясениях.

В XII в. в исламских странах появились двухслойные, гофрированные и составные купола, которые, помимо архитектурной выразительности, существенно упрочняли конструкцию купола в целом (рис. 1).

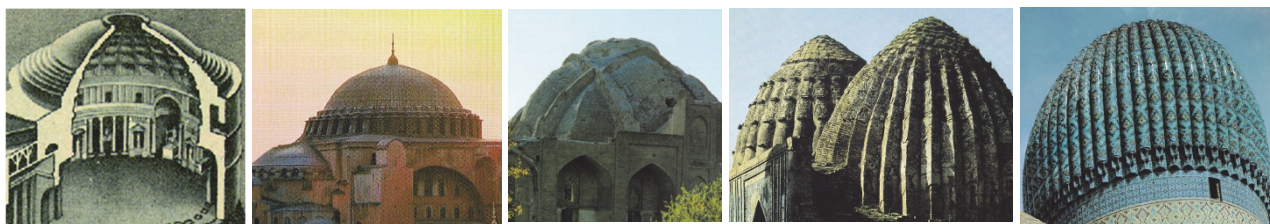


Рис. 1. От гладких каменных куполов до гофрированных
Figure 1. From smooth stone domes to corrugated

Несколько позже в строительных конструкциях романской архитектуры получили распространение своды и купола, усиленные ребрами. В готической архитектуре развили технологию сооружения конструкций из арок, аркбутанов, контрфорсов, что облегчало процесс сборки конструкции и позволяло создавать сложные композиции. В XIV в. в Италии и в XV в. в других странах Западной Европы началась эпоха Возрождения – синтез колоннад, арочных галерей, сводов и куполов, которые придали постройкам величественность.

Первые купола были толстостенными каменными оболочками переменной жесткости. Толщина h купола римского Пантеона менялся от 2,5 м у основания до 1,4 м в вершине при диаметре основания $D = 2R = 43.3$ м; относительная толщина составляла $h/R = 1/8,7–1/15,5$. К XIX в. относительная толщина куполов снизилась до $1/25$. Рождение железобетона способствовало следующему крупному скачку в строи-

тельном деле – толщина покрытия здания с диаметром купола 40 м в городе Йене (Германия, 30-е гг.) составила всего 6 см, то есть относительная толщина $h/R = 1/333!$ С относительной толщиной связана масса единичной площади покрытия m_l . Если масса квадратного метра древнеримского каменного купола составляла около $m_l = 8000 \text{ кг/м}^2$, то у железобетонных покрытий она существенно снизилась: единичная масса купола рынка с пролетом в 76 м в Лейпциге (Германия) составила $m_l = 476 \text{ кг/м}^2$, а квадратный метр покрытия здания в г. Андерсоне (США) составила всего $m_l = 256 \text{ кг/м}^2$. Следующим крупным шагом стало использование металлических покрытий. Появились гладкие (мембранные), подкрепленные ребрами, гофрированные и сетчатые тонкостенные покрытия. В 1896 г. инженер В.Г. Шухов продемонстрировал на Нижегородской выставке сооружение с мембранной крышей. Мембранные покрытия снимали вопрос об устойчивости конструкций, при этом передача усилий растяжением – один из выгодных способов работы конструкций. Примером мембранного покрытия размером $224 \times 183 \text{ м}$ явился стадион «Олимпийский» (Москва), единичная масса покрытия из стальных листов толщиной 5 мм составила всего $m_l = 39 \text{ кг/м}^2$. Большой эффект дают покрытия из алюминиевых сплавов. Так, единичная масса сферического купола из гофрированных панелей толщиной 3,2 мм диаметром 91,5 м и стрелой подъема 25,9 м в Лонгвью (США) снизилась до $m_l = 22,6 \text{ кг/м}^2$ при относительной толщине $h/R = 1/143$.

В строительном деле человечество прошло большой путь: от незатейливых каменных дольменов бронзовой эпохи до изящных тонкостенных покрытий; от примитивных глиняных домов до стоэтажных жилых комплексов; от каменных менгиров до ажурных пятисотметровых телебашен. Сочетание различных конструктивных форм и материалов позволило создать величественные и гармоничные строительные конструкции (рис. 2).

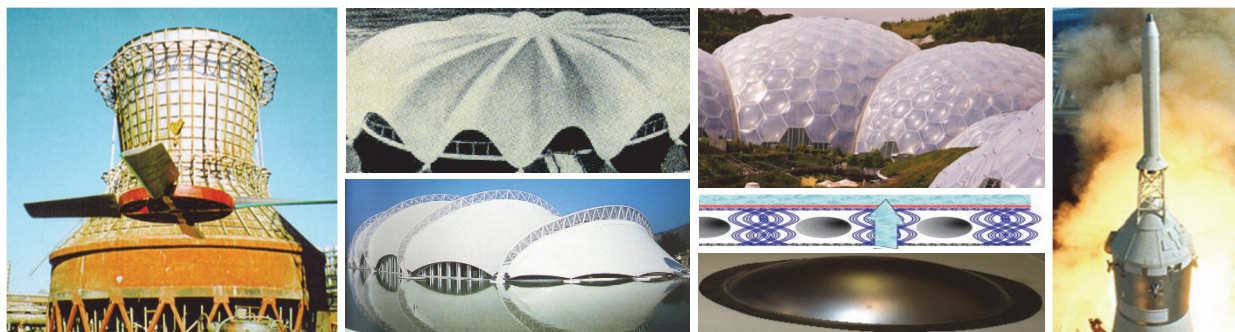


Рис. 2. Тонкостенные и тонкослойные элементы конструкций сложной геометрии и структуры
Figure 2. Thin-walled and thin-layered structural elements of complex geometry and structure

Широкому распространению тонкостенных конструкций способствовали технологические достижения, успешное решение научных задач теории оболочек и развитие методов расчета. Все это позволило создавать относительно совершенные тонкостенные конструкции и сооружения. Хотя по относительным качественным параметрам рукотворные конструкции все еще очень далеки от уникальных природных объектов, в которых форма и материал каждого элемента гармонично сочетается с их функциональностью.

Глубокое изучение природных конструкций, освоение новых технологий производства и совершенствование методов расчета позволит в будущем создавать более изящные и выразительные рукотворные тонкостенные конструкции сложной геометрии и существенно расширить их применение.

Возникающие в процессе эксплуатации проблемы

Конструкции предназначены для выполнения определенных функций в течение заданного срока. К сожалению, многие из них, не отработав заданный срок, разрушаются. С расширением области применения тонкостенных конструкций, в том числе для ответственных изделий нефтехимии и приборостроения, атомной и авиакосмической промышленности, постоянно ужесточаются требования, предъявляемые к их качеству и надежности функционирования. Обеспечение безопасности конструкций является важной проблемой [4–6], которая входит в Перечень критических технологий Российской Федерации (п. 21).

Современные тонкостенные конструкции состоят непосредственно из несущего тонкостенного элемента и защитного покрытия. Для защиты несущих элементов конструкций от коррозии и эрозии, от высоких температур и огня, от вирусов и бактерий, от различных полей и сред, а также для поглоще-

ния волн заданного диапазона активно разрабатываются различные композиционные покрытия, в том числе функциональные и интеллектуальные [7–10].

В процессе эксплуатации тонкостенных конструкций выходят из строя защитные покрытия вследствие изменения свойств покрытия и адгезива. В результате этого на поверхности элемента конструкции возникают различные дефекты (царапины, трещины, вмятины и т. д.), происходит коррозионный износ, появляются локальные углубления и т. д. Все это приводит к существенному перераспределению напряжений в элементах конструкций, к изменению механических свойств поверхностных слоев тонкостенного элемента конструкции, а в области локальных дефектов (рис. 3, 4) возникают концентрации напряжений.



Рис. 3. Коррозионный износ элементов конструкции крупногабаритной градирни ПАО «Нижнекамскнефтехим»
Figure 3. Corrosion wear of structural elements of a large-sized cooling tower of PJSC “Nizhnekamskneftekhim”



Рис. 4. Износ и разрушение элементов конструкции крупногабаритного отстойника ПАО «Нижнекамскнефтехим»
Figure 4. Wear and destruction of structural elements of a large-sized sump of PJSC “Nizhnekamskneftekhim”

Для обеспечения безаварийной работы конструкции с покрытием, находящихся под нагрузкой и испытывающих воздействие физических полей и сред, необходимо грамотно диагностировать состояния элементов конструкций, достоверно оценивать несущую способность составных элементов, включая состояние покрытия и адгезива. Для решения этой комплексной проблемы необходимо уметь определять изменения жесткостных свойств покрытий и адгезии тонкослойного покрытия с тонкостенным элементом, а также оценивать изменение жесткостных свойств под воздействием среды и физических полей. Решение проблемы позволит приостановить разрушение и продлить «жизнь» конструкций, то есть предотвратить техногенную и экологическую катастрофу любого уровня.

Подходы расчета тонкостенных конструкций сложной геометрии

Под оболочками сложной геометрии подразумеваются оболочки, имеющие сложную форму срединной поверхности и сложный контур [5; 11–13]. Различают оболочки канонической формы, описываемые аналитическими формулами, а также оболочки неканонической формы, когда невозможно описать форму аналитически. В начале XX в. были заложены основы линейной теории пластин и оболочек. Далее естественным направлением развития стала нелинейная теория оболочек, в которой учитываются нелинейные компоненты в геометрических [14] и физических соотношениях [15]. Для грамотной диагностики тонкостенных оболочек сложной геометрии необходимо, прежде всего, достоверно оценивать их напряженно-деформированное состояние. Для решения этой задачи по определению НДС тонкостенных конструкций сложной геометрии привлекают известные подходы: метод конечных разностей, метод коллокации, метод граничных элементов, вариационные методы, экспериментальные и др. Получает развитие итерационный подход [16], широко используется метод конечных элементов [17–39].

В теории оболочек применение МКЭ началось с использования плоских конечных элементов [17–26]. Известны элементы, базирующиеся на соотношениях трехмерной теории упругости [17–19; 27]. Для расчета тонкостенных конструкций естественным является оболочечный подход, например [17–19; 28–35]. Многослойные конечные элементы [36–38] получают, как правило, на основе трехмерного конечного элемента сплошной среды с линейной аппроксимацией по толщине с использованием оболочечных гипотез. Имеются работы, в которых рассматриваются большие деформации, в частности [17–19; 39].

Сплайновый вариант метода конечных элементов для расчета НДС оболочек сложной геометрии

Современная технология позволяет в определенной степени изготавливать оболочечные конструкции различной формы. Однако вопросы определения прочности при этом не упрощаются. Для эффективного использования тонкостенных конструкций сложной формы необходимо уметь рассчитывать НДС таких объектов. Возникает необходимость разработки высокоточных методов расчета оболочек сложной геометрии. В традиционном конечно-элементном подходе при рассмотрении объектов сложной геометрии невозможно обеспечить совместность элементов, не обеспечивается даже неразрывность полей перемещений по всей линии соседних элементов, например при рассмотрении изопараметрических элементов.

Эффективным методом оболочечного подхода является сплайновый вариант МКЭ (СВ МКЭ-2) [40–42], оценка точности схемы выполнена в [43]. На первом этапе решается задача параметризации рассматриваемого объекта. Используется аппроксимация искомым неизвестным кубическими сплайнами в пределах каждого элемента. На базе вариационного метода Лагранжа получаются нелинейные уравнения равновесия. На каждом шаге расчета напряженно-деформационного состояния рассматриваемого объекта производится вычисление метрики, тензоров напряжений и деформаций, корректировка геометрических и механических параметров, что позволяет достаточно точно проследить процесс деформирования. Алгоритм программы предусматривает распараллеливание вычисления отдельных блоков с целью ускорения счета.

Оболочечные модели, в том числе СВ МКЭ-2, в силу двумерности постановки, не позволяют определять напряженно-деформированное состояние дефектных областей типа несквозных трещин, локальных углублений и др. Возникает необходимость использования трехмерных моделей. Идея СВ МКЭ-2 развита для расчета НДС элементов конструкций в трехмерной постановке СВ МКЭ-3 [44; 45]. Сочетание идеи параметризации всей области и аппроксимация искомым переменных в пределах каждого элемента эрмитовыми кубическими сплайнами позволяет получать высокоточные согласованные конечные элементы. Разработаны численные модели цилиндрических, тороидальных и циклических оболочек сложной геометрии трехмерными конечными элементами СВ МКЭ-3 и исследованы концентрации напряжений в области локальных углублений (рис. 5) [46–48].

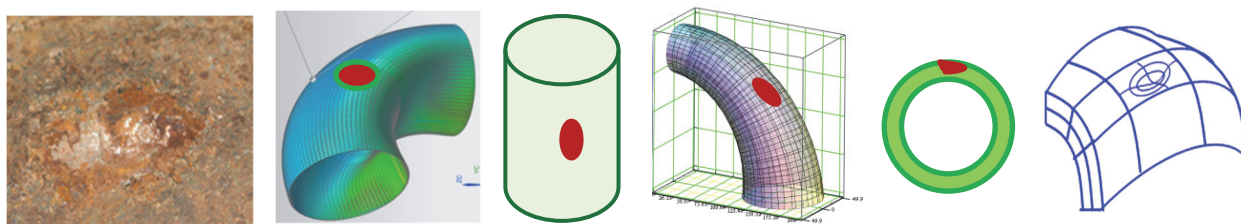


Рис. 5. Локальные углубления в тороидальной, цилиндрической и циклической оболочках: схема модели
Figure 5. Local depressions in toroidal, cylindrical and cyclic shells: model scheme

Дальнейшее развитие сплайнового варианта МКЭ – разработка численной модели синтезированного элемента сложной геометрии на базе трехмерных элементов с кубической аппроксимацией искомым переменных во всех трех направлениях рассматриваемой области и двумерных элементов с кубической аппроксимацией искомым переменных по ее граням. Разработанные модели позволяют определять НДС многослойных [49] и тонкостенных элементов с тонким поверхностным покрытием (рис. 6) [50].

Разработанные варианты метода конечных элементов позволяют проводить оценку НДС конструкций сложной геометрии, в том числе расчет многослойных, тонкостенных конструкций с покрытием и локальными дефектами, а также учитывать специфические поверхностные свойства, отличные от свойств основного массива.

Для задания координат сложных поверхностей и локальных дефектов разработаны способы параметризации: патенты на изобретение № 2374697, № 2517149, № 2665499 (рис. 7, 8).

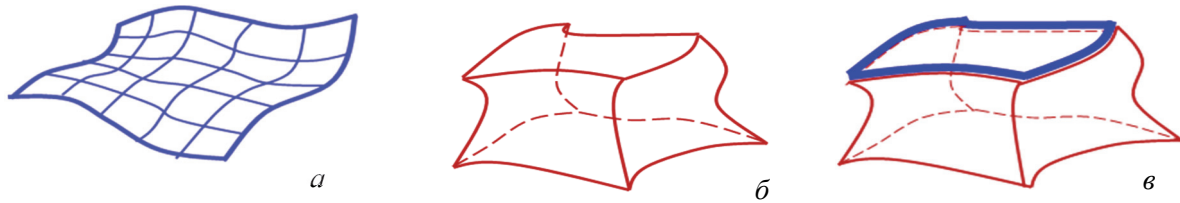


Рис. 6. Объекты исследования по СВ МКЭ-2 (а), СВ МКЭ-3 (б) и СВ МКЭ-2 + СВ МКЭ-3 (в)
Figure 6. Objects of research on spline version: FEM-2 (a), FEM-3 (b) and FEM-3 + SV FE-3 (c)

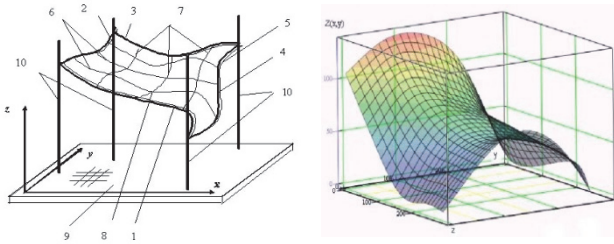


Рис. 7. Поверхности со сложным контуром (патент № 2374697)
Figure 7. Surfaces with a complex contour (Patent No. 2374697)

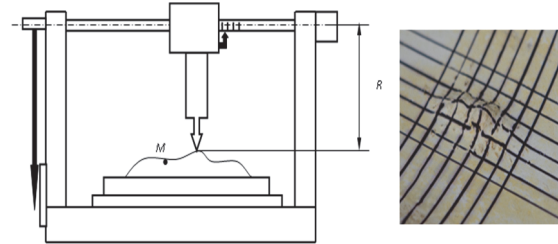


Рис. 8. Локальные углубления, слепок дефекта (патент № 2517149)
Figure 8. Local indentations, defect impression (Patent No. 2517149)

Разработки использованы при расчете корпуса крупногабаритной градирни СК 1200, лопасти вентилятора этой градирни для ПАО «Нижнекамскнефтехим», для оценки концентрации напряжений в области локального углубления в трубопроводе для ООО «Газпром трансгаз Казань». Программа расчета НДС лопаток рабочих колес турбокомпрессора внедрены в НИИ «Турбокомпрессор» и др.

Экспериментально-теоретический метод оценки жесткостных свойств тонкостенных конструкций сложной структуры и геометрии

Исходя из функционального назначения, разрабатываются различные тонкостенные и тонкослойные конструкции, имеющие сложную структуру и геометрию, в частности многослойные композиционные элементы (рис. 9). Сложная структура и геометрия возникает и в процессе эксплуатации конструкций, например вследствие коррозии, царапин и т. д.

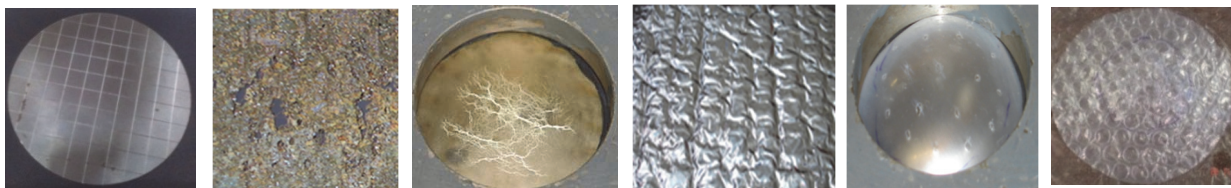


Рис. 9. Примеры тонкостенных элементов конструкций сложной структуры и геометрии
Figure 9. Examples of thin-walled structural elements of complex structure and geometry

Возникают трудности при описании геометрии и структуры тонкостенных элементов даже МКЭ. Стандартное одноосное испытание на растяжение полоски неприемлемо для оценки жесткостных свойств тонкостенных, тонкослойных и композиционных элементов сложной структуры и не применимо для исходно неплоских элементов.

Метод «индентора» [51] неэффективен при исследовании образцов, имеющих сложную структуру и при наличии нано- и микродефектов. В зародышевом состоянии находится молекулярный подход на базе мощных компьютеров, возникают трудности при описании сложной структуры с различными свойствами.

ми составных компонент, а также при задании информации о дефектах на нано-, микро- и макроуровнях одновременно (рис. 10).

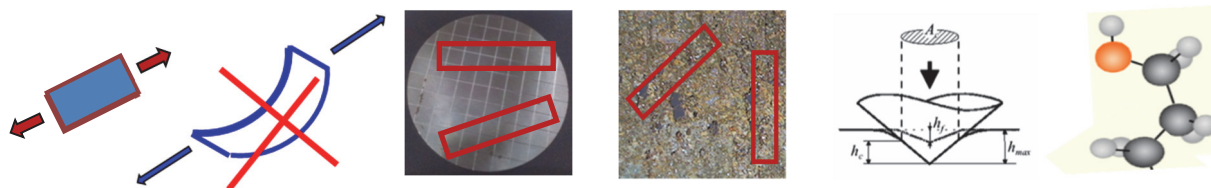


Рис. 10. Невозможность использования известных методов
Figure 10. Impossibility of using known methods

Разработан эффективный двумерный экспериментально-теоретический метод оценки жесткостных свойств тонкостенных, тонкослойных и композиционных элементов конструкций сложной структуры, которые наряду со сложной структурой могут иметь распределенные дефекты (рис. 11) [52–54].

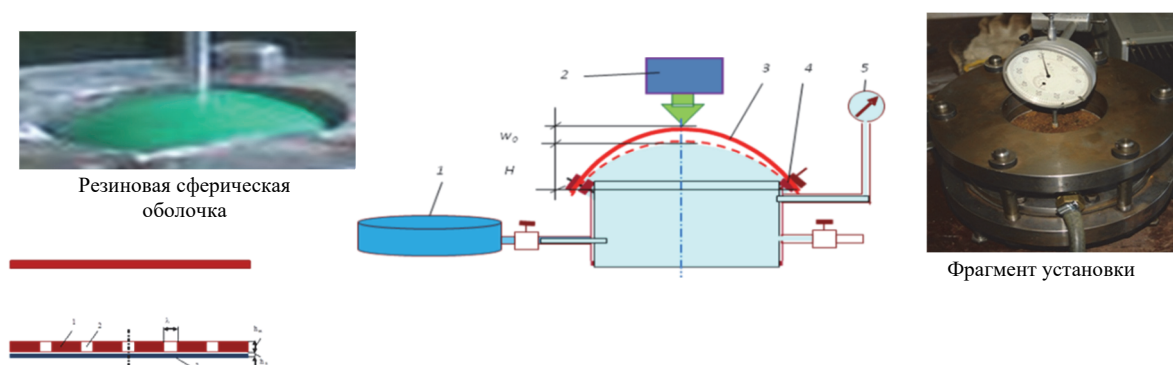


Рис. 11. Схема установки:
1 – источник воздуха; 2 – измерительный комплекс; 3 – образец; 4 – узел крепления; 5 – манометр
Figure 11. Installation diagram:
1 – air source; 2 – measuring complex; 3 – sample; 4 – mounting unit; 5 – pressure gauge

Метод базируется на экспериментальных данных и теоретических соотношениях, полученных из нелинейной теории оболочек. Созданы уникальные экспериментальные установки и разработаны новые способы: патенты № 2184361, 2296976, 2310184, 2387973, 2403556, позволяющие получать стабильные экспериментальные параметры. Исследованы различные образцы, в том числе композиционные структуры [55; 56].

Разработки использованы в ПАО «Нижнекамскнефтехим» при определении модуля упругости тонкостенных элементов конструкций, в ООО «Газпром трансгаз Казань» при анализе способов и моделей определения механических свойств покрытий и адгезива.

Экспериментально-теоретический метод оценки адгезии покрытий

Поверхностные покрытия позволяют решать множество проблем надежности, долговечности и безопасности тонкостенных конструкций. Они обеспечивают защиту и изоляцию поверхности изделий, работающих в различных средах и под воздействием различных физических полей [7–10; 57]. Покрытия формируются на поверхностях конструкций сложной геометрии, например на цилиндрических и тороидальных поверхностях труб. Исходя из условий эксплуатации, разрабатываются покрытия и адгезивы сложной структуры. При выборе покрытия, адгезива и технологии его нанесения появляются вопросы, связанные с определением их необходимых геометрических и физических параметров, с оценкой механических свойств и срока их службы в зависимости от окружающей среды и физических полей и т. д. (рис. 12).

Возникает необходимость оценки свойств покрытий и адгезива и закономерности их изменения под воздействием среды, физических полей, формы поверхности и др. (рис. 13).



Рис. 12. Солнечные паруса LightSail-1 и теплоотражающие мембраны
Figure 12. LightSail-1 solar sails and heat-reflecting membranes

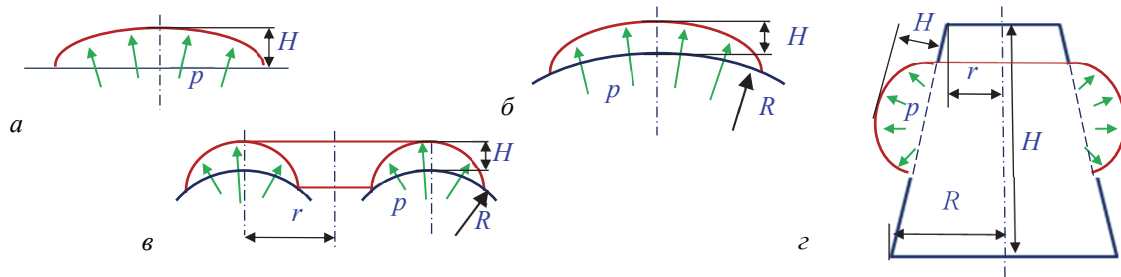


Рис. 13. Схемы нагружений:
 а – плоские; б – сферические; в – тороидальные; з – конические объекты
Figure 13. Loading schemes:
 а – flat; б – spherical; в – toroidal; з – conical objects



Рис. 14. Схемы экспериментальных установок, фото фрагмента установки, расчетное НДС
Figure 14. Schemes of experimental installations, photos of the installation fragment, estimated VAT

Разработан новый экспериментально-теоретический метод оценки адгезии покрытия к плоской и цилиндрической подложке [58; 59]. Впервые исследовано влияние деформации поверхности на адгезию покрытия (рис. 14) [60].

К разработке «Экспериментально-теоретический метод исследования адгезии пленки к подложке» проявила интерес государственная корпорация «Ростех».

Заключение

Диалектика развития конструкций: от простых массивных элементов к тонкостенным конструкциям сложной геометрии и структуры.

Займствование природных аналогов, разработка новых технологий производства и совершенствование методов расчета позволят создавать выразительные рукотворные тонкостенные конструкции сложной геометрии и расширять их применение.

Для обеспечения безаварийной работы тонкостенной конструкции необходимо грамотно диагностировать состояние его элементов.

Сплайновый вариант МКЭ и экспериментально-теоретические методы – эффективный инструмент диагностики тонкостенных конструкций сложной геометрии и структуры.

Список литературы / References

1. Hart-Davies A. (ed.) *Science: the definitive visual guide*. London: Dorling Kindersley Limited; 2009.
2. Al-Hassani S.T.S. *1001 inventions: the enduring legacy of Muslim civilization*. National Geographic; 2012.
3. Yakupov N.M., Galimov Sh.K., Khismatullin N.I. *From stone blocks to thin-walled structures*. Kazan: SOS Publ.; 2001. (In Russ.)
Якупов Н.М., Галимов Ш.К., Хисматуллин Н.И. От каменных глыб к тонкостенным конструкциям. Казань: SOS, 2001. 96 с.
4. Makhutov N.A. *Strength and safety. Fundamental and applied research*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 2008. (In Russ.)
Махутов Н.А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск: Наука, 2008. 523 с.
5. Yakupov S.N., Tameev I.M., Yakupov N.M. *Diagnostics and treatment of pipelines*. Kazan: Kazanskaya Nedvizhimost' Publ.; 2018. (In Russ.)
Якупов С.Н., Тамеев И.М., Якупов Н.М. Диагностика и лечение трубопроводов. Казань: Казанская недвижимость, 2018. 180 с.
6. Collins J.A. *Failure of materials in mechanical design. Analysis, prediction, prevention*. New York: John Wiley & Sons; 1981. (In Russ.)
7. Montemor M.F. Functional and smart coatings for corrosion protection: a review of recent advances. *Surface & Coatings Technology*. 2014;258:17–37.
8. Dry C.M., Sottos N. Smart structures and materials 1993: smart materials // SPIE Proceedings. 1916;1:438–444.
9. Dry C. Procedures developed for self-repair of polymeric matrix composite materials. *Comp. Struct.* 1996;35(3): 263–269. [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(96\)00033-5](https://doi.org/10.1016/0263-8223(96)00033-5)
10. Yakupov S.N., Yakupov N.M. Thin-layer films and coatings. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017;857: 012056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/857/1/012056>
11. Paimushin V.N. *Boundary value problems of deformation mechanics of shells of complex geometry* (dissertation of Doctor of Physical and Mathematical Sciences). Kazan; 1979. (In Russ.)
Паймушин В.Н. Краевые задачи механики деформирования оболочек сложной геометрии: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Казань, 1979. 402 с.
12. Rekach V.G., Krivoshapko S.N. *Calculation of shells of complex geometry*. Moscow: Peoples' Friendship University; 1988. (In Russ.)
Рекач В.Г., Кривошапко С.Н. Расчет оболочек сложной геометрии. М.: Университет дружбы народов, 1988. 177 с.
13. Krivoshapko S.N., Ivanov V.N. *Encyclopedia of analytical surfaces*. Switzerland: Springer; 2015.
14. Mushtari Kh.M., Galimov K.Z. *Non-linear theory of thin elastic shells*. Jerusalem; 1962.
15. Pyushin A.A. *Plasticity*. Moscow: Gostekhizdat Publ.; 1948. (In Russ.)
Ильюшин А.А. Пластичность. М.: Гостехиздат, 1948. 376 с.
16. Zverayev E.M. Выделение согласованных уравнений классической теории оболочек из трехмерных уравнений теории упругости // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 2. С. 135–148. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-2-135-148>
Zverayev E.M. Extraction of consistent shell theory equations from 3D theory of elasticity. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019;15(2):135–148. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-2-135-148>
17. Golovanov A.I., Pesoshin A.V., Tyuleneva O.N. *Modern finite element models and methods for studies of thin-walled structures*. Kazan: Kazan State University; 2005. (In Russ.)
Голованов А.И., Песошин А.В., Тюленева О.Н. Современные конечно-элементные модели и методы исследования тонкостенных конструкций. Казань: КГУ, 2005. 442 с.
18. Yang H.T.Y., Saigal S., Masud A., Karania R.K. A survey of recent shell finite elements. *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*. 2000;47:101–127.
19. Members C., Ashwell D.G., Gallagher R. *Finite elements for thin shells and curved members*. London: John Wiley & Sons; 1976.
20. Herrmann I.R. Finite element bending analysis for plates. *Journal of Engineering Mechanics*. 1967;93(5):13–26.
21. Argyris J.H., Fried I., Scharpf D.W. The TUBA family of plate elements for the matrix displacement methods. *The Aeronautical Journal*. 1968;72(692):701–709.
22. Fraeijs de Veubeke B. Displacement and equilibrium models in the finite element methods. *Stress Analysis*. New York; 1965. p. 145–197.
23. Connor J., Brebbia C.A. A stiffness matrix for shallow rectangular shell element. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1967;93(5):43–65.
24. Elias Z.M. Duality in finite element methods. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1968;94(4):931–948.
25. Lee S.W., Dai C.C., Yeom C.H. A triangular finite element for thin plates and shells. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1985;21(10):1813–1831.

26. Gallagher R.H. Finite element representation for thin shell instability analysis. *Buckling of Structures*. Cambridge; 1974. p. 40–51.
27. Sakharov A.S., Kislooky V.N., Kirichevsky V.V., Altenbach I., Gabbert U., Dankert Yu., Keppler H., Kochyk Z. *The finite element method in the mechanics of solids* (A.S. Sakharov, I. Altenbach, eds.). Kiev: Vishcha Shkola Publ.; 1982. (In Russ.)
Сахаров А.С., Кислокий В.Н., Киричевский В.В., Альтенбах И., Габберт У., Данкерт Ю., Кепплер Х., Кочык З. Метод конечных элементов в механике твердых тел. Киев: Вища школа, 1982. 479 с.
28. Argyris J.H., Scharpf D.W. The SHEBA family of shell elements for the matrix displacement methods. *The Aeronautical Journal*. 1968;72(694):873–883.
29. Clough R.W., Johnson R.J. A finite element approximation for the analysis of thin shell. *International Journal of Solids and Structures*. 1968;4(1):43–60.
30. Brebbia C.A., Nath J.M.D. A comparison of recent shallow shell finite element analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1970;12(10):849–857.
31. Ahmad S., Irons B., Zienkiewicz O. Analysis of thick and thin shell structures by curved finite elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1970;2(3):419–451.
32. Dupuis D., Goel J.J. A curved finite element for thin elastic shells. *International Journal of Solids and Structures*. 1970;6(11):1413–1428.
33. Dawe D.J. Rigid-body motions and strain-displacement equations of curved shell finite elements. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1972;14(9):569–578.
34. Sabir A.B., Lock A.C. A curved, cylindrical shell, finite element. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1972;14(2):125–135.
35. Irons B.M., Razzaque A. A further modification to Ahmad's shell element. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1973;5(4):588–589.
36. Kant T., Menon M.P. Higher-order theories for composite and sandwich cylindrical shells with finite element. *Computers and Structures*. 1985;33(5):1191–1204.
37. Noor A.K., Burton W.S., Bert C.W. Computational models for sandwich panels and shells. *Applied Mechanics Reviews*. 1996;49:155–199.
38. Nayak A.K., Moy S.S.J., Sheno R.A. Free vibration analysis of composite sandwich plates based on Reddy's higher order theory. *Composites Part B. Engineering*. 2002;33:505–519.
39. De Sousa R.J.A., Cardoso R.P.R., Valente R.A.F., Yoon J.-W., Grácio J.J., Natal Jorge R.M. A new one-point quadrature enhanced assumed strain (EAS) solid-shell element with multiple integration points along thickness. *Int. J. Numer. Meth. Engng.* 2005;62(7):952–977. <https://doi.org/10.1002/nme.1226>
40. Yakupov N.M. Calculating complex shells. *Proceedings of a Shell Theory Seminar*. 1984;17(II):4–17.
Якупов Н.М. Об одном методе расчета оболочек сложной геометрии // Исследования по теории оболочек: труды семинара. Вып. 17. Ч. II. Казань, 1984. С. 4–17.
41. Kornishin M.S., Yakupov N.M. *Spline variant of finite element method for the calculation of complex shells. Prikladnaya Mekhanika*. 1987;23(3):38–44.
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.
42. Kornishin M.S., Yakupov N.M. To the calculation of shells of complex geometry in cylindrical coordinates based on the spline version of the FEM. *Prikladnaya Mekhanika*. 1989;25(8):53–60.
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.
43. Dautov R.Z. Estimation of the accuracy of FEM schemes based on rectangular elements with numerical integration for shells of complex geometry. *Proceedings of a Shell Theory Seminar*. 1992;27:22–36.
Даутов Р.З. Оценка точности схем МКЭ на основе прямоугольных элементов с численным интегрированием для оболочек сложной геометрии // Исследования по теории оболочек: труды семинара. Вып. 27. Казань, 1992. С. 22–36.
44. Yakupov N.M., Kiyamov H.G., Yakupov S.N., Kiyamov I.Kh. Modeling of structural elements of complex geometry by three-dimensional finite elements. *Mechanics of Composite Materials and Structures*. 2011;17(1):145–154. (In Russ.)
Якупов Н.М., Киямов Х.Г., Якупов С.Н., Киямов И.Х. Моделирование элементов конструкций сложной геометрии трехмерными конечными элементами // Механика композиционных материалов и конструкций. 2011. Т. 17. № 1. С. 145–154.
45. Yakupov N.M., Kiyamov H.G., Yakupov S.N. Modelling of cyclic shells with complex geometry three-dimensional finite elements. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;1158:042038. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1158/4/042038>
46. Kanyukov R.A., Yakupov N.M., Tameev I.M., Kiyamov Kh.G., Yakupov S.N., Kanyukov R.R. Modeling of the stress – strain state of a cylindrical body with a local depression by three – dimensional finite elements. *Nauka i Tekhnika v Gazovay Promyshlennosti*. 2012;(2):53–60. (In Russ.)
Кантюков Р.А., Якупов Н.М., Тамеев И.М., Киямов Х.Г., Якупов С.Н., Кантюков Р.Р. Моделирование напряженно-деформированного состояния цилиндрического тела с локальным углублением трехмерными конечными элементами // Наука и техника в газовой промышленности. 2012. № 2. С. 53–60.

47. Yakupov N.M., Kiyamov H.G., Mukhamedova I.Z. Simulation of toroidal shell with local defect. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2020;41(7):1310–1314.
48. Yakupov N.M., Kiyamov H.G., Mukhamedova I.Z. Calculation of the fragments toroidal shell with local internal deepening. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2021;42(9):2257–2262.
49. Yakupov S.N., Kiyamov H.G., Yakupov N.M. Modeling a synthesized element of complex geometry based upon three-dimensional and two-dimensional finite elements. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2021;42(9):2263–2271.
50. Yakupov S.N., Kiyamov H.G., Yakupov N.M. Numerical model of the structural element complex geometry with a coating. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021;1954:012054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1954/1/012054>
51. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*. 1992;7:1564–1583. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
52. Yakupov N.M., Nurullin R.G., Yakupov S.N. Mechanical properties of thin films and nanofilms. *Russian Engineering Research*. 2010;29(6):571–574.
53. Galimov N.K., Yakupov N.M., Yakupov S.N. Experimental-theoretical method for determining the mechanical characteristics of spherical films and membranes with a complex structure. *Mechanics of Solids*. 2011;46(3):380–386. <https://doi.org/10.3103/S0025654411030058>
54. Yakupov N.M., Galimov N.K., Yakupov S.N. Methodology of studying non-planar films and membranes of complex structure. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2019;85(2):55–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-2-55-59>
- Якупов Н.М., Галимов Н.К., Якупов С.Н. Методика исследования неплоских пленок и мембран сложной структуры // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 2. С. 55–59. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-2-55-59>
55. Yakupov N.M., Kharislamova L.U. Stiffness of compositions with delamination's and the influence of ultraviolet on adhesion. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2019;40(6):840–845. <https://doi.org/10.1134/S199508021906026X>
56. Yakupov S.N., Kharislamova L.U., Yakupov N.M. Studying the stiffness of thin-layered compositions with delaminations. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;1281:012092. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1281/1/012092>
57. Yakupov S.N., Yakupov N.M. Research of mechanical characteristics thin coating. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;1328:012103.
58. Yakupov N.M., Yakupov S.N., Gubaydullin R.I. Research of adhesion of a covering on cylindrical surfaces. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;1281(1):012091. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1281/1/012091>
59. Yakupov S.N., Gubaidullin R.I., Yakupov N.M. Determination of hardness of thin layer coating and its adhesion to the shell of the cylindrical form. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;1158:042039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1158/4/042039>
60. Yakupov S.N., Gubaidullin R.I., Yakupov N.M. Investigation of the influence of the nature of surface deformation on coating adhesion. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021;1954:012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1954/1/012053>