

УДК 539.3+624.014

С.Н. Якупов¹, Н.М. Якупов¹¹ Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН (Казань, Республика Татарстан, Россия).

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА

В статье рассматриваются малоизученные проблемы коррозии при наличии механических деформаций и физических полей, а также проблема определения жесткостных характеристик тонкослойных покрытий и адгезионных свойств связующего покрытия, являющихся барьером от коррозионного износа. Отмечается эффект воздействия магнитного поля на снижение коррозионного износа, а также новый способ защиты конструкций от коррозии.

Ключевые слова: коррозия, защитные покрытия, адгезия, нагруженные элементы конструкции, экспериментально-теоретический метод, жесткостные свойства, магнитное поле, защита от коррозии.

Среди множеств актуальных проблем, стоящих перед специалистами, занимающимися проектированием, изготовлением и эксплуатацией различных конструкций и сооружений, следует отметить проблему предупреждения техногенных катастроф тонкостенных конструкций, работающих в различных средах под воздействием физических полей при больших нагрузках.

В процессе эксплуатации конструкций и сооружений защитные покрытия выходят из строя вследствие изменения механических и физических характеристик непосредственно покрытия и адгезива. В результате этого на поверхности элементов конструкций возникают различные коррозионные и механические дефекты. Речь идет о металлических объектах, изготовленных из сплавов железа, – металл продолжает оставаться одним из основных материалов, используемых в современных конструкциях, в том числе в трубопроводных системах, и имеет склонность к коррозии. Появление дефектов приводит к изменению механических свойств поверхностных слоев элементов конструкций, а в области локальных углублений возникают концентрации напряжений.

Практическое применение железа восходит к X веку до н.э. С началом использования металла [1] появилась и проблема коррозионного износа. По данным [2], более 80% конструкций работают в агрессивных средах.

При рассмотрении коррозии обычно не учитывают изменения механических характеристик приповерхностных слоев, однако при коррозионном износе элемент конструкции может значительно изменить свои характеристики. Особенно это актуально для тонкостенных элементов конструкций. Упрощенно это явление можно называть разрыхлением материала на некоторую глубину (или на всю глубину – для тонкостенных элементов). В результате имеем материал с измененными физико-механическими характеристиками. Поэтому вопросы, связанные с определением механических или жесткостных характеристик тонкостенных элементов, подверженных коррозионному износу, весьма актуальны. Коррозионный износ и проблема защиты конструкций и оборудования, в том числе трубопроводных систем, является одной из актуальных проблем современности. Некоторые проблемы безопасности трубопроводов рассмотрены

в работах [3–7]. Проблема входит в Перечень критических технологий Российской Федерации (п. 21), утвержденный Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899.

Для обеспечения безаварийной работы тонкостенных конструкций и сооружений необходимо: грамотно диагностировать состояния элементов конструкций (оценка реальной несущей способности); разработать способы и устройства «лечения» и защиты элементов конструкций, работающих под большой нагрузкой и испытывающих воздействие физических полей и сред [8]. Решение комплексной проблемы позволит приостановить разрушение и продлить жизнь (эксплуатационную пригодность) конструкций, включая трубопроводные системы, т.е. предотвратить техногенную и экологическую катастрофы различных уровней. Эти обстоятельства особенно значимы для химических, нефтехимических и других предприятий, где особо остро стоят проблемы обеспечения технической и экологической безопасности.

В работе рассмотрены некоторые проблемы, связанные с покрытием тонкостенных конструкций, являющимся первым барьером на пути коррозионного износа, а также

проблемы коррозии при наличии механических деформаций и физических полей.

ПОКРЫТИЯ

Среди тонкостенных элементов конструкций, сочетающих легкость с высокой прочностью, особо выделяются пленочные и мембранные элементы, к которым относятся и различные покрытия. Они находят широкое применение во всех отраслях производства и жизнедеятельности [9]. Покрытия позволяют решать множество проблем надежности, долговечности и безопасности тонкостенных конструкций и сооружений, обеспечивая изоляцию поверхности конструкций от различных сред и от воздействия

Существенные изменения свойств происходят, например, при наличии полимерных составляющих композиций под воздействием полей и сред, а также при появлении различных поверхностных дефектов (поверхностных царапин, вмятин, трещин, локальных углублений и т.д.).

Нарушение защитной изоляции может привести к серьезным последствиям. Существенную роль в защите от коррозии играет тип и параметры изоляции конструкций, на которой в процессе эксплуатации возникают различные дефекты. При этом, как отмечается в работе [10], размер дефекта в изоляции и возможная скорость коррозии взаимосвязаны между

тий и адгезива под воздействием среды, физических полей и других факторов.

Стандартный подход одноосного растяжения для двумерных объектов – неплоских покрытий сложной структуры – практически неприменим (малоэффективен) для определения жесткостных характеристик покрытий сложной структуры, формируемых непосредственно на поверхностях сложной формы, в частности на цилиндрических и тороидальных поверхностях. Метод «индентора», позволяющий определять свойства материала в окрестности заданной точки, малоэффективен при исследовании покрытий, имеющих сложную структуру.



физических полей. Покрытия являются одним из эффективных способов защиты от коррозии.

Необходимые качества покрытий обеспечиваются путем разработки сложных тонкослойных композиционных структур и адгезива, которые формируются непосредственно на поверхностях конструкций, например труб (на цилиндрических и тороидальных поверхностях).

При эксплуатации конструкций и сооружений в результате воздействия окружающей среды, физических полей, а также человеческого фактора происходят изменения механических и физических характеристик покрытий и адгезива.

С увеличением размера дефекта в изоляции возрастает и скорость коррозии независимо от формы коррозионного поражения. При этом большую опасность, по данным [10], представляют дефекты, размеры которых соизмеримы с толщиной стенки элемента конструкций.

Возникает необходимость оценки механических (в частности, жесткостных) и физических (например, проницаемость) свойств покрытий и адгезионных свойств связующего покрытия с элементом конструкции (адгезива), а также исследования закономерностей изменения характеристик покры-

Оценка адгезии покрытия к подложке на базе существующих измерителей адгезии дает разброс в замерах – трудно обеспечить идентичность замеров в процессе изучения влияния среды, деформации поверхности и физических полей [11].

Покрытия, имеющие малую толщину по сравнению с другими двумя их размерами, необходимо рассматривать минимум как двумерные объекты, и, естественно, для получения достоверных результатов необходимо использовать двумерный подход.

В лаборатории нелинейной механики оболочек ИММ КазНЦ РАН

разработан эффективный экспериментально-теоретический метод анализа жесткостных характеристик тонких структур плоской и неплоской форм [12–14]. Начаты работы по исследованию различных композиционных покрытий [15–17], а также по определению адгезии покрытий [11, 18–21].

Далее предполагается развить метод и алгоритм исследования жесткостных и адгезионных характеристик тонких покрытий на цилиндрических и тороидальных поверхностях, а также выполнить исследования по изменению свойств покрытий и адгезива под воздействием окружающей среды и физических полей. Такие исследования позволят выполнять сравнительную оценку характеристик новых покрытий и адгезива при анализе их эффективности (например, при подборе материалов и технологий), а также при оценке технического состояния покрытий уже находившихся в эксплуатации конструкций, например трубопроводов (на вырезанных из трубопровода фрагментах – «катушках»). Также нужно разработать на базе экспериментальных исследований модели влияния различных факторов для систем «покрытие – подложка».

КОРРОЗИОННЫЙ ИЗНОС НАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

В настоящее время наблюдается большой износ металлических конструкций во всех отраслях, в некоторых случаях износ достигает до 50% и более. По данным [22], основными причинами аварий в газопроводах за последние пять лет являлись коррозия, стресс-коррозия и брак строительно-монтажных работ. О лавинообразном росте аварий, связанных преимущественно с коррозионным растрескиванием под напряжением, говорится в [23]. Проблема актуальна практически для всех отраслей промышленности и транспорта, где имеются металлические тонкостенные конструкции.

На поверхности металла, находящегося в агрессивной среде, образуется тонкий защитный (пассивирующий) слой, при разрушении которого начинается коррозионное разрушение [24, 25]. Одним из факторов, способствующих разрушению защитной пленки при коррозионном износе, является механическая деформация. Очевидно, что при деформации элемента конструкций пассивирующая пленка также подвергается деформации, что снижает ее защитные свойства. Работы по исследованию коррозии на нагруженных тонких образцах в двумерной постановке встречаются редко, несмотря на их практическую значимость. Влияние напряжений на процесс коррозии отмечается в [26]. Анализ некоторых работ, учитывающих влияние на коррозию механических напряжений, приведен в [27].

В [28] предложена модель влияния механических деформаций на толщину пассивирующего слоя, а в [29] на базе экспериментально-теоретического метода исследований дан ответ на вопрос, на каких поверхностях интенсивнее идет процесс коррозионного износа: на растянутых или сжатых. Установлено, что коррозионный износ на растянутых поверхностях идет быстрее, чем на сжатых, не менее чем в 1,5 раза.

КОРРОЗИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Среди факторов, влияющих на разрушение защитного (пассивирующего) слоя, при коррозии, наряду с деформацией [29], можно отметить влияние физических полей, в частности магнитного поля [30] и ультрафиолетового (УФ) излучения [31]. Исследования, посвященные изучению влияния магнитного поля и УФ на процесс коррозионного износа, встречаются сравнительно мало. Тема новая и актуальная. Идет постоянный процесс поиска новых способов защиты конструкций от коррозии. Эффект влияния магнитного поля [30] на снижение коррозионной активности открыва-

ет большие возможности по защите от коррозии. Обнадеживающие данные в подтверждение этого направления дают результаты ряда исследований.

Для предупреждения коррозии трубопроводов пытаются использовать магнитное поле с целью снижения коррозионной активности перекачиваемой жидкости [32, 33] и др. Способ ингибиторной обработки скважинной жидкости с использованием магнитного поля рассмотрен в работе [34], а в статье [35] отмечается: «Результаты промышленных испытаний показали, что применение физического воздействия магнитного поля значительно снижает коррозионную активность перекачиваемых по промышленным трубопроводам жидкостей».

В статье [36] отмечается, что «при воздействии постоянного магнитного поля коррозионно-усталостная долговечность стали 17Г1С увеличивается в 1,37 раза на воздухе и в 1,2 раза – при воздействии коррозионной среды (3% NaCl)». Авторы [37] установили, что в растворе NaCl магнитное поле повышает сопротивляемость от коррозии сплава никеля-цинка с низким содержанием никеля.

Магнитное поле, приложенное к железным образцам, находящимся в растворе серной кислоты, позволило снизить коррозию железного образца на 80% [38]. Влияние соединений бензола на коррозию стали при воздействии магнитного поля рассмотрено в статье [39].

Ряд исследований, проведенных в лаборатории НМО ИММ КазНЦ РАН, показал эффект снижения коррозионного износа стальных образцов в агрессивной жидкости при наличии магнитного поля [30, 40–50], а в [51] предложены способ и устройство, разработанные на базе этого эффекта.

По данным [52], в присутствии магнитного поля общая коррозия меди существенно ускоряется, а скорость локальной коррозии железа, никеля и нержавеющей сталей зависела от направления

приложенного магнитного поля. Установлено влияние направления силовых линий магнитного поля Земли на коррозионный износ стальных образцов [53].

Исходя из представленного обзора работ, видно, что направление «Коррозия при воздействии физических полей» мало изучено. При этом в отмеченных работах в основном получен положительный эффект от воздействия магнитного поля на снижение коррозионного износа [30, 36–39, 49–50].

Отрицательный эффект влияния остаточного магнитного поля на процесс коррозионного износа получен автором [54], который, к сожалению, не приводит ссылки и сравнения результатов с известными работами по данной теме, опубликованными в общедоступных журналах. В [54] автор отмечает, что усилению коррозии способствуют пять факторов (комплексно), среди которых и остаточная намагниченность. Очевидно, необходи-

мо было изучать проблему в общей постановке или установить взаимовлияние этих пяти факторов на коррозионный износ, в частности установить взаимовлияние остаточной намагниченности и вязкости жидкости для анализа вклада каждого фактора в развитие коррозионного процесса. Утверждение, что эффект высокой намагниченности наблюдается только на Урманском месторождении, также вызывает сомнение. Среди возможных факторов, сыгравших негативную роль в полученных результатах, можно рассмотреть также «источник неклассических блуждающих токов, которым является геомагнитное поле Земли» [55].

В [54] образцы подвергались воздействию магнитного поля в течение четырех суток, при этом не ясно, как были направлены силовые линии магнитного поля. Возникает также вопрос: зависит ли остаточная намагниченность от времени воздействия?

Для оценки степени коррозионного износа в [54] использует гравиметрический метод (достаточно устаревший), который при очистке корродированных образцов для взвешивания может дать большой разброс результатов (образцы имели различную степень плотности отложения). Нужно было также привести замеренные толщины образцов в конце эксперимента для сравнения с расчетными величинами скорости коррозии. Следовало бы использовать для контроля и другие способы оценки степени коррозии. В частности, можно было бы использовать эффективный экспериментально-теоретический метод, разработанный в НМО ИММ КазНЦ РАН, позволяющий судить о степени износа по изменению жесткостных свойств двумерных образцов. Для разрешения сомнений, вызванных [54], и практического применения эффекта влияния магнитного поля на процесс коррозии нужно вы-

 **PRIMATEK**
coating innovation

PRIMATEK INNOPIPE® —
БЕСКОМПРОМИССНОЕ РЕШЕНИЕ
В ЗАЩИТЕ ОТ КОРРОЗИИ!

WWW.PRIMATEK.RU

МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВОГО
СЕКТОРА

- НАДЕЖНАЯ ЗАЩИТА И СТАБИЛЬНОЕ КАЧЕСТВО
- СООТВЕТСТВИЕ СОВРЕМЕННЫМ СТАНДАРТАМ
- ИННОВАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ
- КОНКУРЕНТНЫЕ ЦЕНЫ



полнить дополнительные исследования.

Идет процесс постоянного поиска новых способов и подходов защиты от коррозии. В 2015 г. получен базовый патент на изобретение № 2547067 [51]. Для демонстрации эффекта защиты магнитным полем от коррозии и дальнейшего широкого распространения разрабатываемых способов и устройств на основе патента [51] необходимо выполнить конкретные испытания на образцах трубы с воздействием и без воздействия магнитного поля с отработкой режимов защиты и дальнейшее испытание этих труб до разрушения. Также необходимо провести поиск рациональных режимов и схем в зависимости от конкретных внутренних и внешних параметров трубопровода и условий эксплуатации, поиск новых эффек-

тивных вариантов схем и способов для снижения коррозии, а также изучить возможности управления явлением коррозионного износа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимо исследовать закономерности изменения свойств покрытий неплоской формы и адгезива под воздействием среды, физических полей и других факторов, используя экспериментально-теоретический метод.

Обзор известных работ показывает, что во всех трудах, за исключением одного, отмечается эффект снижения коррозионного износа стальных образцов в агрессивной жидкости при наличии магнитного поля.

Необходимо провести цикл исследований, варьируя материалы, среду, время воздействия средой, напряженность и направленность

магнитного поля и т.д., а также провести концептуальное исследование управления коррозионным износом.

Эффект снижения коррозии при воздействии магнитного поля открывает новый подход к защите конструкций (в частности, с использованием изобретения, на которое получен базовый патент № 2547067).

Часть работ выполнена в рамках проекта «Механические характеристики материалов тонкостенных элементов со сложной структурой при воздействиях полей и сред» по программе «Механика поверхностных и интерфейсных явлений в проектировании материалов с повышенным сопротивлением разрушению и изнашиванию». Часть работы выполнена по проекту № 16-38-00253, РФФИ.

Литература:

1. Велиюлин И.И., Кантюков Р.А., Якупов Н.М., Тамеев И.М., Якупов С.Н., Кантюков Р.Р., Гиниятуллин Р.Р., Нургалиев А.Р. О коррозии трубопроводов // Наука и техника в газовой промышленности. 2015. № 1. С. 45–50.
2. Буторина М.В., Воробьев П.В. и др. Инженерная экология и экологический менеджмент. М.: Логос, 2002. 528 с.
3. Якупов Н.М. Механика: проблема – идея – практика. Казань: Казан. гос. ун-т, 2010. 161 с.
4. Якупов Н.М., Хисматуллин Н.И. О причинах аварии и техногенных катастроф на нефтехимических предприятиях // SOS, Казань. 1997. Вып. 1. С. 26–32.
5. Кантюков Р.А., Якупов Н.М. и др. Проблемы безопасности трубопроводов // Газовая промышленность. 2012. № 9. С. 14–18.
6. Якупов Н.М., Хисматуллин Н.И. Некоторые проблемы трубопроводов в АО НКНХ // SOS, Казань. 1999. Вып. 3. С. 34–36.
7. Кантюков Р.А., Якупов Н.М., Тамеев И.М., Якупов С.Н., Кантюков Р.Р. Проблемы безопасности трубопроводов // Газовая промышленность. 2012. № 9. С. 14–18.
8. Якупов Н.М. Механика «лечения» тонкостенных конструкций // Сборник трудов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань: Изд-во Казанского (Приволжского) федерального университета, 2015. С. 4320–4322.
9. Якупов Н.М., Якупов С.Н. Пленки неоднородной структуры // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2009. № 1. С. 60–70.
10. Кузнецова Е.Г., Алексеева Н.В., Медников А.В., Ремезкова Л.В. Распределение потенциала и скорости растворения вдоль участка металлического трубопровода при пересечении границы раздела двух грунтов // Защита металлов. 1988. Т. 24. № 5. С. 777.
11. Якупов С.Н. Механика системы «подложка – пленка» // Сборник трудов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань: Изд-во Казанского (Приволжского) федерального университета, 2015. С. 4323–4325.
12. Галимов Н.К., Якупов Н.М., Якупов С.Н. Экспериментально-теоретический метод определения механических характеристик сферических пленок и мембран со сложной структурой // Механика твердого тела. 2011. № 3. С. 58–66.
13. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Якупов С.Н. Методология исследования механических характеристик тонких пленок и нанопленок // Вестник машиностроения. 2009. № 6. С. 44–47.
14. Якупов Н.М., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н. Методика испытания пленок и мембран в условиях равномерного распределенного поверхностного давления // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 11. С. 54–56.
15. Харисламова Л.У., Якупов С.Н., Якупов Н.М. Экспериментальные исследования композиционных пленок // Труды XII Международной конференции «Пленки и покрытия». СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2015. С. 87–89.
16. Харисламова Л.У., Якупов С.Н. Механические характеристики пленочных композиций // Труды VIII Международной научно-практической конференции «Инженерные системы». М.: РУДН, 2015. С. 27–32.
17. Харисламова Л.У. Экспериментальное исследование биологических оболочек и полимерных композиционных материалов // Сборник трудов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань: Изд-во Казанского (Приволжского) федерального университета, 2015. С. 3973–3975.
18. Якупов С.Н., Якупов Н.М. Исследования систем «подложка – пленка» // Труды XII Международной конференции «Пленки и покрытия». СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2015. С. 81–83.
19. Якупов С.Н. Экспериментально-теоретический метод исследования адгезии пленки к подложке // Deformation and Failure of Composite Materials and Structures (DFCMS-2014), М., 2014. С. 35.
20. Гольдштейн Р.В., Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Якупов С.Н., Якупова Р.Н. Способ определения адгезии пленки к подложке: Патент № 2421707 РФ. Опубл. Бюл. № 17. 2011. 9 с.

21. Якупов С.Н. Способ определения адгезии пленки к подложке: Патент по заявке 2014145390 с приоритетом 11.11.2014.
22. Алимов С.В. Техническое обслуживание и капитальный ремонт газопроводов – основа обеспечения надежности газотранспортной системы ОАО «Газпром» // Материалы V Международной конференции «Обслуживание и ремонт газонефтепроводов». М.: ООО «Газпром Экспо», 2011. С. 3–13.
23. Мостовой А.В., Хасанов Р.Н., Подуков О.Г. Оптимизация капитального ремонта магистральных газопроводов // Материалы V Международной конференции «Обслуживание и ремонт газонефтепроводов». М.: ООО «Газпром экспо», 2011. С. 87–93.
24. Frumkin A.N. Comments to the Theory of Hydrogen Overpotential, *Z Phys. Chem.*, 1932, Vol. 160, p. 116.
25. Колотыркин Я.М., Фрумкин А.Н. Влияние концентрации кислоты и добавок платины на растворение никеля // Докл. АН СССР. 1941. Т. 33. № 7–8. С. 451–454.
26. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. М.: Металлургия, 1981. 271 с.
27. Локощенко А.М. Методы моделирования влияния окружающей среды на ползучесть и длительную прочность металлов // Успехи механики. 2002. № 4. С. 90–120.
28. Сидоренко С.Н., Якупов Н.М. Коррозия – союзник аварий и катастроф. М.: Изд-во РУДН, 2002. 93 с.
29. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н. Влияние характера деформирования поверхности элементов конструкции на коррозионный износ // Проблемы прочности. 2012. № 2. С. 76–84.
30. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н. Влияние магнитного поля на коррозионный износ // Доклады АН. 2012. Т. 443. № 2. С. 173–175.
31. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н. Влияние ультрафиолетового излучения на коррозионный износ стальных образцов // Доклады АН. 2012. Т. 446. № 6. С. 624–626.
32. Тебенихин Е.Ф. Безреагентные методы обработки воды в теплоэнергетике. М.: Энергия, 1977. 184 с.
33. Smith C., Coetzee P.P., Meyer J.P. The effectiveness of a magnetic physical water treatment device on scaling in domestic hot-water storage tanks. Available at: <http://www.ajol.info/index.php/wsa/article/viewFile/4921/12597>. Access date: 07.04.2011.
34. Классен В.И. Вода и магнит. М.: Наука, 1973. 111 с.
35. Хайдаров Ф.Р. Повышение работоспособности промысловых трубопроводов за счет снижения коррозионной активности перекачиваемых жидкостей // Нефтегазовое дело. 2002. № 1. С. 1–9.
36. Худяков М.А., Алтынова Р.Р. Влияние постоянного магнитного поля на циклическую трещиностойкость и коррозионную стойкость стали 17Г1С // Нефтегазовое дело. 2006. Т. 4. № 1. С. 286.
37. Chouchanea S., Levesque A., Zabinskie P., Rehamnia R., Chopart J.-P. Electrochemical corrosion behavior in NaCl medium of zinc-nickel alloys electrodeposited under applied magnetic field. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, № 506, pp. 575–580.
38. Sueptitz R., Tschulik K., Uhlemann M., Gebert A., Schultz L. Impact of magnetic field gradients on the free corrosion of iron. *Electrochimica Acta*, 2010, № 55, pp. 5200–5203.
39. Maayta A.K., Mohammad M. Fares, Al-Shawabkeh Ali F. Influence of Linear Alkyl Benzene Sulphonate on Corrosion of Iron in Presence of Magnetic Field: Kinetic and Thermodynamic Parameters. *International Journal of Corrosion*, 2010, Article ID 156194, 9 pp.
40. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р. Исследование механических характеристик тонкостенных элементов, находящихся в агрессивной среде под воздействием магнитного поля // Материалы V Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики АНТЭ-2009». Казань, 2009. Т. 2. С. 381–385.
41. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Шафигуллин Р.И. Экспериментальное исследование влияния внешних факторов на коррозионный износ элементов конструкций // Труды II Международной конференции «Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела». Казань, 2009. С. 442–445.
42. Якупов Н.М., Галимов Н.К., Киямов Х.Г., Абдюшев А.А., Якупов С.Н., Гиниятуллин Р.Р., Шагидуллина Л.Н. Механика тонкостенных структур при воздействии механических нагрузок, агрессивной среды и физических полей // Отчет о НИР, зарег. в ЦИТИС. № 02201058268, 2010. 46 с.
43. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р. Влияние физических полей на коррозионный износ тонкостенных элементов конструкций // Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики АНТЭ-2011». Казань, 2011. Т. 2. С. 133–137.
44. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р. Коррозионный износ под воздействием физических полей // Труды X Международной конференции «Пленки и покрытия». СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2011. С. 100–103.
45. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р. Коррозионный износ тонкостенных элементов при воздействии внешних факторов // Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 20-летию ИММ КазНЦ РАН. Казань: Фолиант, 2011. Т. 2. С. 203–212.
46. Якупов Н.М., Галимов Н.К., Абдюшев А.А., Якупов С.Н., Гиниятуллин Р.Р., Шагидуллина Л.Н. Механика тонкостенных тел под воздействием физических полей и сред // Отчет о НИР, зарег. в ЦИТИС № 02201254415. 2012. 84 с.
47. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н. Влияние физических полей на коррозионный износ // Труды V Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2012». М.: РУДН, 2012. С. 88–94.
48. Yakupov N.M., Giniyatullin R.R., Yakupov S.N. Influence of the magnetic field on corrosive wear. 19th European Conference on Fracture: Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety. Kazan, Russia, 26–31 August, 2012, 6 pp.
49. Yakupov N.M., Giniyatullin R.R., Yakupov S.N. Effect of a Magnetic Field on Corrosive Wear. *Doklady Physics*, 2012, Vol. 57, No. 3, pp. 104–106.
50. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р. Определение механических характеристик тонкостенных элементов, подверженных воздействию сред и физических полей // Труды 11-й Международной конференции «Пленки и покрытия». СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2013. С. 84–86.
51. Якупов Н.М., Велиюлин И.И., Якупов С.Н., Нуруллин Р.Г., Гиниятуллин Р.Р. Устройство для предотвращения коррозии: Патент № 2547067 РФ. Опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10. 10 с.
52. Змирина Т. Скорая гибель в магнитном поле // Наука и жизнь. 2006. 3 авг. Режим доступа: <http://www.nkj.ru/news/5875/>. Дата обращения 07.04.2016.
53. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н. Влияние направления силовых линий магнитного поля Земли на коррозионный износ // Доклады АН. 2015. Т. 463. № 6. С. 684–686.
54. Кузьмин М.И. Повышение эффективности эксплуатации нефтяных скважин в условиях намагничности подземного оборудования: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. СПб., 2013. 20 с.
55. Ивонин А.А. Влияние геомагнитного поля Земли на защиту от коррозии МГ ООО «Газпром трансгаз Ухта» // Коррозия «Территории «НЕФТЕГАЗ». 2015. №1 (30). С. 88–89.