

Председателю диссертационного совета
Д 002.075.01 при Институте проблем
машиноведения РАН (г. Санкт-Петербург)
чл.-корр. РАН, д.физ.-мат.н., проф.
Индейцеву Дмитрию Анатольевичу

ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н., проф. Озябкина Андрея Львовича на диссертационную работу **Перекрестова Аршавира Петровича** «Повышение технического ресурса подвижных сопряжений технологическими методами (на примере работы компрессора в агрессивной среде с сероводородом)», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.02.04 «Трение и износ в машинах».

Актуальность выполненных диссертантом исследований.

Согласно правил безопасности ПБ 08-622-03 для газоперерабатывающих заводов и производств Госгортехнадзора России от 05.06.2003 к компрессорному оборудованию предъявляются повышенные требования безопасности. В диссертационной работе диссертант предлагает импортозамещающую технологию повышения эксплуатационных сроков газоперерабатывающих агрегатов, в частности узлов трения цилиндропоршневой группы компрессора, путём применения соответствующих смазочных материалов и присадок к ним с высокими защитными свойствами, предохраняющими подвижные сопряжения компрессоров от коррозии и износа. Актуальность темы диссертационного исследования подтверждается выполненными НИОКР по темам: «Теоретические и экспериментальные исследования некоторых явлений, возникающих при контактах тел» (№ госрегистрации 01.20.0501723, 2004-2008 гг.), «Теоретические и экспериментальные исследования некоторых явлений, возникающих при сближении тел» (№ госрегистрации 01.20.0904642, 2009-2013 гг.), «Изучение явлений, возникающих при использовании магнитных смазочных материалов в узлах трения» (№ госрегистрации 114031870033, 2014 г.).

Общая методология и методика исследований.

Для формирования новых знаний о функционировании элементов цилиндропоршневой группы компрессоров газоперерабатывающих заводов Астраханского газоконденсатного месторождения, разработки новых смазочных материалов для работы трибосопряжений в сероводородсодержащей среде автором предложены новые методики исследования. К ним следует отнести методики исследования коррозионно-механического изнашивания трибосопряжений с использованием как теоретического, так и физического моделирования на машинах трения, теории размерностей физических параметров. В процессе исследований процессов трения диссертант использовал широко апробированные на практике атомно-абсорбционный, атомно-эмиссионный спектральный и рентгенофлуоресцентный анализ, а также металлографические методы исследования. В качестве инструментальных средств использовались современные приборы отечественного и зарубежного производства, а также базовые положения трибологии, методы физико-математического моделирования, планирования экспе-

римента, разработанные автором оригинальные методики, позволяющие проводить испытания по различным схемам трения в широком диапазоне нагрузочно-скоростных условий эксплуатации.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в диссертации.

Высокая степень обоснованности приведённых в работе научных положений, выводов и рекомендаций достигается корректной постановкой задач, использованием вышеперечисленных методов исследований. Представленные уточнённые расчётные модели позволили автору учесть основные специфические условия эксплуатации узлов трения цилиндро-поршневой группы компрессоров под негативным воздействием сероводорода, оценить влияние коррозионного действия газовой среды на интенсивность изнашивания материалов.

Анализируемая диссертация включает введение, семь глав основного текста, изложенных на 280 страницах, основных результатов и выводов, списка использованных источников из 456 наименований и четырёх приложений. Всего диссертация включает шесть положений научной новизны и девять пунктов основных выводов. Рассмотрим степень обоснованности и достоверности каждого из выводов.

Первый вывод. Обоснованность и достоверность исследований на испытательных установках для исследования процессов трения и изнашивания подвижных соприкосновений в сероводородсодержащих смазочных материалах подтверждаются исследованиями второй главы. Автором запатентованы: машина трения для исследования трибологических характеристик жидких органических смазывающих сред (патент РФ № 2239171); устройство для определения изнашивания пар трения (патент РФ № 57908); конструкция механических прессов (патент РФ № 2234074) с целью повышения точности определения функциональной зависимости интенсивности изнашивания трущихся поверхностей от величины нормального давления и её временной характеристики в условиях как обычных, так и агрессивных сред. Результаты исследований зарегистрированы патентом РФ № 115917 в виде противоизносной присадки с находящимися в ней мицеллами на основе молекул твёрдой пластичной смазки оксида железа Fe_3O_4 с окружающими их молекулами олеиновой кислоты.

Второй вывод. Обоснованность и достоверность результатов исследований коррозионно-механического изнашивания цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) компрессоров по наличию малых концентраций этаноламинов и влаги в смазочных материалах представлено в третьей главе при моделировании на машине трения торцового типа. Для адекватности модельных исследований автором в шестой главе выделены основные факторы, влияющие на интенсивность изнашивания стенок цилиндра, и разработан теплофизический контактный критерий, характеризующий как молекулярно-механическое, коррозионное и температурное воздействие, так и свойства граничной смазки адсорбционной природы. Это позволило диссертанту установить нагрузочно-скоростные условия изнашивания ЦПГ компрессора и характер влияния сероводорода на коррозионно-механическое изнашивание.

Достоверность и обоснованность *третьего вывода* не вызывает сомнений, так как исследования выполнены в третьей и четвёртой главах диссертации на машине трения торцового типа с применением методики физического моделирования процессов трения и изнашивания элементов ЦПГ и корректным применением сертифициро-

ванных комплексов (спектрофотометра «Хитачи 180-50», рентгенофлуоресцентного сканирующего спектрометра VRA-30 и атомно-абсорбционного спектрометра «МГА-915»)

Четвёртый вывод. Как было указано в достоверности и обоснованности второго и третьего выводов, разработанный автором критерий коррозионной стойкости и уравнение для прогнозирования коррозионно-механического изнашивания ЦПГ компрессора и использование сертифицированного измерительного оборудования позволили автору установить в третьей главе негативное воздействие сероводорода, находящегося в газовой среде перекачиваемого природного газа, на изнашивание пар трения ЦПГ.

Пятый вывод. На основе корректно разработанного критериального уравнения интенсивности изнашивания гильзы цилиндра шестой главы автором в третьей главе экспериментально получены нелинейные уравнения коэффициентов трения, что позволило автору обоснованно выбрать смазочный материал по критерию минимума диссипации энергии в окружающее пространство при трении пар трения ЦПГ.

Шестой вывод. Исследования коррозионно-механического изнашивания пары трения «поршневое кольцо – гильза цилиндра» в агрессивной газовой среде, выполненные автором в третьей главе, позволили автору установить факт аварийных остановок в результате снижения антифрикционных и противоизносных свойств смазочных масел в присутствии сероводорода и разработать в седьмой главе технологию по предотвращению аварийных ситуаций при эксплуатации компрессорного оборудования. Достоверность и обоснованность указанных исследований подтверждается устройством для предотвращения влажного хода компрессора (патент РФ № 2303754), устройством для измерения количества сконденсированного пара (патент РФ № 2370735), схемой привода многоцилиндрового бесшатунного компрессора (патент РФ № 2290535) и устройством газожидкостного сепаратора для уменьшения попадания этаноламинов и влаги в элементы ЦПГ.

Седьмой вывод. Результаты обоснованности трибологических исследований магнитных противоизносных присадок и их компонентов, приведённые в пятой главе, подтверждаются запатентованным устройством для определения их эффективности (патент РФ № 2348025), а также методикой физического моделирования процессов трения на машине трения СМТ-1 (глава 6).

Восьмой вывод. Достоверность и обоснованность исследований на машине трения СМТ-1 свойств магнитных присадок на мицеллярной основе и применения магнитных жидкостей, приведённых в главе 5, подтверждаются применением методики физического моделирования, описанного в главе 6, а также известного метода атомно-абсорбционного анализа продуктов изнашивания, использованием действующих стандартов разложения проб масла (ГОСТ 26929-94, ГОСТ 26929-94) или СВЧ минерализатора типа «Минотавр-1».

Девятый вывод относится к практической значимости диссертационных исследований.

Обоснованность основных научных положений и выводов подтверждается удовлетворительной сходимостью теоретических расчётов с результатами экспериментальных исследований, проведённых с использованием сертифицированного программного обеспечения и аппаратуры. Дополнительным подтверждением обоснованности рекомендаций и выводов являются эксплуатационные испытания, выполнен-

ные автором. Кроме того, основные положения диссертационной работы прошли апробацию на 18 международных и Российских научно-практических конференциях и опубликованы в 42 статьях, 22 из которых входят в список ВАК, 2 – международные системы цитирования.

Научная новизна полученных результатов работы заключается в том, что в ней на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические, технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в надёжность и безопасность эксплуатации компрессорного оборудования газоперерабатывающих заводов. К числу наиболее значимых, на мой взгляд, следует отнести:

- разработки экспресс-метода исследования интенсивности изнашивания пар трения на базе атомно-абсорбционного анализа продуктов изнашивания, приведённого во второй главе диссертации;
- получение математических зависимостей, описывающих процессы скорости развития коррозионно-механического изнашивания, а также изменения коэффициента трения. Эти результаты в третьей главе показали удовлетворительную сходимость теоретических и экспериментальных исследований;
- создания в пятой главе противоизносной магнитной присадки на мицеллярной основе с использованием нанотехнологий, позволяющей заменить импортные смазочные материалы отечественными;
- на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований главы шесть разработка критерия подобия интенсивности коррозионно-механического изнашивания гильзы цилиндра поршневого компрессора, что позволило автору выявить природу воздействия сероводорода, находящегося в газовой среде перекачиваемого природного газа, на поверхности трения.

Значение выводов и рекомендаций, полученных в диссертации, для науки и практики.

Выполненные автором теоретические и экспериментальные исследования позволили не только расширить и углубить развитие знаний о функционировании узлов трения цилиндро-поршневой группы компрессоров газоперерабатывающих заводов, но и открыть перспективные возможности для получения магнитных жидкостей с металлами в качестве магнитной фазы; методы предотвращения сероводородной коррозии технологического оборудования применением парофазных ингибиторов, позволяющих осуществлять эффективную защиту на труднодоступных участках защищаемой поверхности.

Существенное значение для науки имеют следующие полученные результаты:

- разработан экспресс-метод исследования интенсивности изнашивания пар трения на базе атомно-абсорбционного анализа продуктов изнашивания;
- разработанная и запатентованная методика атомно-абсорбционного анализа для оценки интенсивности изнашивания конструкционных материалов;
- разработанная и запатентованная методика создания магнитного поля в зоне трения сопряжённых поверхностей;

– выявлена природа воздействия сероводорода, находящегося в газовой среде перекачиваемого природного газа, на поверхности трения элементов цилиндропоршневой группы компрессоров;

– установлено отрицательное влияние малых количеств этаноламинов, попадающих в смазочную среду, на работоспособность пары трения «поршневое компрессионное уплотнительное кольцо – гильза цилиндра»;

– созданы уникальные критерии подобия модельных и натуральных исследований узлов трения цилиндропоршневой группы компрессоров.

Существенное значение для практики имеют следующие научные результаты:

– предложена и запатентована новая схема малогабаритного многоцилиндрового бесшатунного компрессора;

– разработаны (запатентованы) устройства для замера износа прецизионных деталей топливной аппаратуры дизельных двигателей, создана методика по их применению;

– создана, запатентована и апробирована противоизносная магнитная присадка на мицеллярной основе с использованием нанотехнологий, позволяющая заменить импортные смазочные материалы отечественными;

– созданы и защищены авторскими свидетельствами трибометры для определения смазочной способности углеводородных сред.

Разработки конкретных методов испытаний, конструкций, технологий и эффективных трибологических смазочных материалов подтверждены 16 патентами РФ. О полезности разработок диссертанта свидетельствуют 10 дипломов за разработанные конструктивные решения, акты внедрения результатов диссертационной работы на Астраханском газоперекачивающем заводе, экономический эффект от внедрения которых составил более 2,3 млн. руб. на один компрессор, а также акты внедрения научной работы в учебном процессе.

Внутреннее единство структуры работы.

Диссертация Перекрестова Аршавира Петровича охватывает основные задачи решаемой научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается:

– наличием последовательного плана исследований, включающего разработку теоретической базы, проведение экспериментальных исследований, стендовых и натуральных испытаний, обобщение полученных результатов и их внедрение;

– наличием непротиворечивой методологической платформы, обеспечивающей достижение поставленной цели исследования коррозионно-механического изнашивания металлических пар в сероводородсодержащих смазочных материалах и повышения износостойкости и надёжности ответственных узлов трения компрессоров.

Диссертация изложена на 351 странице машинописного текста. Структура работы сформирована логично. *В первой главе* выполнен анализ причин выхода из строя подвижных сопряжений компрессоров, рассмотрены наиболее характерные виды коррозии и влияние механических факторов на надёжность узлов трения оборудования. *Во второй главе* приводится описание разработанного и запатентованного экспериментального оборудования, представлены новые методики исследования коррозионно-механического изнашивания трибосопряжений компрессорного оборудования. *В третьей главе* рассмотрено технологическое влияние агрессивных сред различного

состава и процесса коррозии на изнашивание подвижных трибосопряжений компрессорного оборудования в различных смазочных материалах. В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований по влиянию смазочных материалов с различными физико-химическими свойствами на процессы трения и изнашивания трибосопряжений. Пятая глава посвящена исследованию свойств и применению магнитных жидкостей, в частности, разработанной и запатентованной противоизносной магнитной присадки на мицеллярной основе. В шестой главе выполнены теоретические исследования природы коррозионно-механического изнашивания трибосопряжений, проведён обзор существующих моделей изнашивания и разработан алгоритм расчёта износа деталей узла трения, выделены основные факторы, влияющие на интенсивность изнашивания стенок цилиндра компрессора и разработаны уникальные критерии подобия, которые позволили адекватно провести стендовые и лабораторные исследования и получить научные результаты исследований. Завершающая седьмая глава посвящена описанию разработанной технологии по предотвращению аварийных ситуаций при эксплуатации компрессорного оборудования и совершенствованию компрессорной техники.

Автореферат в полном объёме отражает основное содержание текста диссертации.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Результаты диссертации А.П. Перекрестова соответствуют следующим областям и пунктам исследований специальности 05.02.04 – Трение и износ в машинах:

пункт 1 – механические, тепловые, химические, магнитные, электрические явления при трении (главы 3, 4, 5, 7);

пункт 3 – закономерности различных видов изнашивания и поверхностного разрушения (главы 2, 3, 4, 5, 6);

пункт 4 – смазочное действие: газодинамическая смазка, газостатическая смазка (главы 3, 4);

пункт 5 – трение в газовых средах (главы 3, 4);

пункт 8 – триботехнические свойства смазочных материалов (главы 4, 5);

пункт 10 – физическое и математическое моделирование (глава 6);

пункт 14 – нанотрибология (глава 5).

Следовательно, все области исследований рассматриваемой диссертационной работы строго соответствуют паспорту специальности 05.02.04 – Трение и износ в машинах.

Замечания по диссертации.

1) Согласно требований ГОСТ Р 7.0.11-2011 по оформлению диссертации во введении должна быть отражена начальная часть автореферата. Однако часть информации отсутствует: например, нет сведений о работах на указанную тему, выполненных ранее, о степени их проработанности; целях и задачах исследований; научной новизне, выносимой на защиту; теоретической и практической значимости научной работы; методологии, методах исследования; достоверности и апробации положений и выводов по диссертации.

2) После выполненного автором в первой главе обзора литературных источников и проблем, возникающих при эксплуатации компрессорного оборудования газо-

перерабатывающих заводов, автор не указал конкретно цель и задачи диссертационной работы, решаемые в последующих главах.

3) Для изучения влияния трибологических факторов на коррозионно-механическое изнашивание трущихся пар автором использован или создан ряд установок и машин трения. Была ли проведена сертификация установок и машин трения, а также их измерительных комплексов?

4) Во второй главе приведены исследования атомизации пробы при определении кадмия. Из-за отсутствия сравнительного анализа рекомендованных автором модификаторов матричной основы для элементов, подверженных влиянию процесса износа, не понятно, по каким критериям они выбраны? Чем, например, в таблице 2.2 модификатор $Mg(NO_3)_2$ лучше или хуже модификатора NH_4VO_3 ? Как они влияют на интенсивность изнашивания цилиндрично-поршневой группы компрессора?

5) За счёт чего сокращается период работы машины трения для получения величины интенсивности изнашивания на концентрате «Квант-2А-ГРГ»? Как оценивалась ошибка такого подхода к сокращению периода исследований?

6) В выводах по второй главе указывается, что «созданное оборудование и разработанные методики позволяют проводить мониторинг долговечности энергетического и технологического оборудования газоперерабатывающих заводов». Однако не указано, каким образом возможно реализовать мониторинг и по каким параметрам при эксплуатации оборудования возможна диагностика компрессорного оборудования и мониторинг их функционирования?

7) Вторая глава носит описательный характер и не показано, в чём состоит оригинальность применённых Вами машин трения, установок и методик проведения экспериментов. Какова научная и (или) практическая новизна указанных методик и оборудования?

8) В третьей главе автор снова выполняет обзорный анализ существующих методов расчёта износа (интенсивности, темпа), межремонтного срока службы, но нигде в содержании этой главы не приведены результаты выполненных исследований указанных параметров. Отсутствует единая терминология. Может быть на рисунках 3.2 – 3.7 представлены результаты темпа износа, а не скорости изнашивания? Это также относится и к методу теории размерности, описанного автором в подразделе 3.6 для прогнозирования изнашивания трущихся пар в агрессивной среде. Здесь на странице 111 диссертант ссылается на критериальное уравнение подобия интенсивности изнашивания, однако не отражает, как можно применить это уравнение для оценки интенсивности изнашивания модельных и натурных исследований.

9) Выводы по третьей главе в большей степени не отражают содержания главы. Как можно понять такие выводы, как:

а) «исследования изнашивания пар трения ... исследовались многими авторами в течение длительного времени»

б) «были выявлены ..., но вывести универсальную формулу для расчёта изнашивания деталей не удалось»;

в) «было установлено, что в настоящее время *нет универсального способа определения изнашивания*, а одни способы дополняют другие».

По первому выводу – где конкретные результаты исследований и выводы по ним? По второму выводу – как это понять? Если результаты исследований не завершены, то, моему мнению, необходимо далее проводить исследования.

По третьему выводу – чем это доказывается, какой способ автор предлагает для преодоления такого результата исследований?

10) Нет описания на странице 265 диапазонов варьирования факторов модели коррозионно-механического изнашивания (x – роста температуры и y – количества влаги) при исследовании скорости изнашивания $v(t, \varphi)$ и давлении 1 МПа. Как оценивались характеристики воспроизводимости, адекватности модели и как изменится полученная автором модель при других значениях давления? Найден ли оптимум и удалось ли Вам снизить эти значения для достижения минимальной интенсивности изнашивания? Каковы значения коэффициент трения и интенсивности изнашивания в гидродинамическом режиме трения и при граничной смазке? Как вами установлена минимальность толщины смазочной плёнки 0,05 мкм? (по материалам автореферата).

11) В шестой главе рассматривается физическое моделирование по методам Брауна Э.Д., Евдокимова Ю.А., Чичинадзе А.В. Однако остаётся неясным, каким методом в вашем случае осуществлялся анализ влияния механических факторов на процесс коррозии – методом ранговой корреляции или случайного баланса?

12) По моему мнению, выводы по шестой главе также не достаточно аргументированы. Например, при изменении параметров агрессивности и влажности среды чем обусловлено линейное представление уравнения регрессии коррозионно-механической модели изнашивания трущихся пар трения? На основании каких показателей автор предлагает прогнозировать процессы изнашивания на машинах трения и оценивать их вероятность? По каким результатам установлено на странице 271, что область определения (чего?) рационально брать в виде эллипса?

13) Многие рисунки и формулы выполнены с низким разрешением и качеством, что ухудшает восприятие получаемой информации.

14) В автореферате автором указано, что подвижные модельные образцы изготавливались из Стали 45. Уточните, пожалуйста, соответствуют ли подвижные части модельных исследуемых образцов из Стали 45 натурным, а также не ясны масштабы подобия рабочим характеристикам эксплуатации натуральных образцов пары трения «поршневое кольцо – гильза цилиндра».

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о порядке присуждения учёных степеней»

Отмеченные замечания работы А.П. Перекрестова существенно не снижают уровня рассматриваемой диссертации, выполненной на достаточно высоком научно-техническом уровне.

Диссертационная работа А.П. Перекрестова «Повышение технического ресурса подвижных сопряжений технологическими методами (на примере работы компрессора в агрессивной среде с сероводородом)», представленная на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.02.04 «Трение и износ в машинах», является законченной научно-исследовательской квалификационной работой, актуальной для газоперерабатывающих заводов Российской Федерации, обладает научной новизной. В работе изложены автором теоретические и экспериментальные закономерности влияния продуктов добычи газа на коррозионно-механическое изнашивание металлических пар в сероводородсодержащих смазочных материалах, а также методы и способы повышения износостойкости и надёжности ответственных узлов трения компрессоров. На этой основе разработан новые противоизносные маг-

