

Председателю диссертационного  
совета

Д 002.075.01 при Институте проблем  
машиноведения РАН (г. Санкт-  
Петербург)

чл.-корр. РАН, д.физ.-мат.н., проф.  
Индайцеву Дмитрию Анатольевичу

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н. Невшупы Романа Александровича на диссертационную работу **Перекрестова Аршавира Петровича** на тему: «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 избранной темы

Проблема выхода из строя перекачивающего и газотранспортного оборудования на газовых месторождениях, содержащих «кислые» газы (сероводород и диоксид углерода), является значимой не только в России, где, по данным Международного Энергетического Агентства, 34% газовых месторождений имеют примеси этих газов, но и в других крупных газодобывающих регионах таких, как Ближний Восток (60% месторождений), и, в целом, в 43% месторождений в мире. В диссертационной работе соискатель на основе глубокого и всестороннего анализа предлагает технически доступные и рентабельные методы, а также апробированные технологические решения, которые уже позволили заменить ряд импортных материалов и даже превзойти их по своим функциональным характеристикам. Это, в свою очередь, создает предпосылки не только для импортозамещения, но и для продвижения новых технологий и материалов, разработанных соискателем, на мировые рынки. Актуальность темы диссертационного исследования подтверждается не только выполненными НИОКР и полученными патентами, но и внедрением результатов исследований на крупном действующем предприятии (АГПЗ), с потенциальным экономическим эффектом, исчисляемым миллионами рублей за срок эксплуатации компрессорного оборудования.

## **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Приведённые в работе научные положения, выводы и рекомендации характеризуются значительной степенью обоснованности и достоверности, поскольку базируются на тщательном и всестороннем анализе проблем функционирования цилиндро-поршневых групп (ЦПГ), работающих в среде агрессивных газов, на примере компрессорного оборудования газоперерабатывающего завода; корректной постановке задач исследования; применением апробированных и широко используемых методов и оборудования, в том числе атомно-абсорбционного, атомно-эмиссионного и рентгенофлуоресцентного анализа; адекватном физическом моделировании трибологических процессов с использованием оригинальных машин трения, позволяющих выявить влияние параметров среды и условий работы цилиндро-поршневой группы на трение и изнашивание. Разработанное оборудование защищено рядом патентов и опробовано на практике. Описанные в диссертации экспериментальные результаты в целом подтвердили основные теоретические закономерности, полученные с использованием теории подобия, теории вероятностей, математической статистики и регрессионного анализа. Полученные выводы и результаты не противоречат основным положениям физики, химии, механики, трибологии и других отраслей науки. Обоснованность основных научных выводов также подтверждается удовлетворительной сходимостью теоретических расчётов с результатами экспериментальных исследований, проведённых с использованием лицензированного программного обеспечения и аппаратуры.

Диссертация изложена на 282 страницах, включая введение, семь глав и основные результаты и выводы. Кроме этого, представлены список из 456 использованных источников и четыре приложения. В диссертации сформулированы следующие девять основных выводов, обоснованность и достоверность которых рассматриваются подробно.

**Вывод 1.** Разработка новых специализированных испытательных установок для исследования процессов трения и изнашивания подвижных сопряжений в сероводородсодержащих смазочных материалах (патенты РФ № 2239171; № 57908 и № 2234074) обосновывается необходимостью адекватного воспроизведения реальных условий работы подвижных сопряжений при физическом моделировании трибологических процессов, что является залогом достоверности полученных результатов, и что невозможно достичь при помощи универсальных машин трения. Диссертанту успешно удалось разработать и создать натурные образцы машины трения для исследования трибологических характеристик жидких органических смазывающих сред, устройства для

определения изнашивания пар трения и конструкцию механических прессов, которые позволили получить новые знания о влиянии давления и состава газов, усилия нагрузки, температуры и содержания примесей на динамические процессы трения и изнашивания. Хотя в диссертации подробно не описаны метод измерения силы трения и калибровка датчиков силы, следует положительно отметить применение диссидентом современных методов анализа износа элементов подвижных сопряжений с использованием индикаторов из химически чистых элементов и спектрометрических методов анализа содержания металлов в смазочных маслах, что позволило изучить динамику процессов изнашивания без применения радиоактивных изотопов.

**Вывод 2.** Результаты исследований влияния парциального давления сероводорода и примесей воды в различных видах смазочных масел и при различных условиях работы (температура, давление) на коррозионно-механическое изнашивания элементов ЦПГ компрессоров получены при физическом моделировании на машине трения и представлены в третьей главе. Полученные результаты не только полностью обосновывают наблюдаемые на практике явления коррозии и преждевременного выхода из строя компрессорного оборудования при нарушении режимов очистки газа от примесей и абсорбента, но и выявляют функциональные зависимости интенсивности изнашивания от множества факторов. Так, показан синергетический эффект довольно малых (0,1-0,2 %) примесей этаноламинов и воды в присутствии сероводорода на интенсивность изнашивания, что особенно сильно проявляется при смазывании гидрофильным синтетическим погиалкилгликольным маслом марки Orites 270 по сравнению с минеральным или синтетическим маслом на основе полиолефинов. Обоснованность и достоверность полученных экспериментальных результатов подтверждается адекватностью примененной схемы трения с использованием элементов реальной ЦПГ компрессора, воспроизведением условий среды (состав и давление газов, температура) и условий трения (скорость, нагрузка), а также использованием апробированных методов измерения износа по анализу содержания металлов в смазочном масле. Кроме того экспериментальные результаты показывают хорошую воспроизводимость. Полученные экспериментальные результаты обоснованы теоретически с позиций физико-химии и трибохимии как химическая коррозия в механически напряженном материале, приводящая к образованию сульфидов железа и водорода. Продукты реакции в свою очередь способствуют разупрочнению стали, особенно высокопрочных марок, водородному растрескиванию, усталости и способствуют интенсификации износа. Этот вывод целиком соответствует современным представлениям о механо-коррозии в агрессивных газах и является достаточным обоснованием обнаруженных закономерностей. Не менее важна теоретически

показанная автором тенденция к увеличению концентрации сероводорода в зоне трения, которая обоснована транспортом сероводорода примесями этаноламина в зону трения.

**Вывод 3.** Эффективность разработанных присадок для снижения механико-химического износа элементов ЦПГ обоснована экспериментальным физическим моделированием процессов изнашивания, применением апробированных методов и оборудования для анализа износа по содержанию металлов в смазочном масле, использованием ранее апробированных на других смазочных материалах присадок (ингибиторов коррозии и противоизносных) и воспроизводимостью результатов. Диссертант произвел экспериментальное исследование 19 различных композиций трех основных масел с различными присадками при различных условиях трения и выявил наиболее эффективную из выбранных композиций. Полученный результат достоверно объяснен с позиций молекулярно-механической теории трения и подтвержден реальными испытаниями на действующем компрессорном оборудовании.

**Вывод 4.** На основе экспериментальных исследований, приведенных в третьей главе, диссертант подтвердил негативное влияние сероводорода на изнашивание ЦПГ при любых исследованных комбинациях базовых масел (минеральное, синтетическое на основе полиолефинов и синтетическое на основе полиалкилогликоля) и комплекса присадок. Для учета коррозионной составляющей при механо-химическом изнашивании соискателем предложен критерий коррозионной стойкости, зависящий как от комплекса геометрических размеров, так и комплекса агрессивности среды. В шестой главе, на основе теории подобия, диссертант детализировал формулу для определения коррозионного критерия, введя в виде аргументов такие комплексы как влажность, содержание сероводорода в газе, номинальная площадь трения и толщина смазочной пленки. Данный подход полностью обоснован сложностью физико-химических процессов, протекающих в зоне трения ЦПГ, что не позволяет разработать общую теорию. В этой связи диссертант следует принятому в трибологии подходу, при котором вначале анализируются отдельные стороны явлений, возникающие при контактном взаимодействии поверхностей, а затем исследуется их взаимосвязь. Выбор аргументов коррозионного критерия обоснован закономерностями химической коррозии, а также особенностями транспорта сероводорода к зоне трения за счет попадания влаги и этаноламинов в смазочное масло. Несмотря на то, что трудно согласиться с предложенным диссертантом объяснением процесса разрушения пузырьков пены этаноламинов в зоне трения, не вызывает сомнения, что именно примеси этаноламинов ответственны за перенос сероводорода в зону трения. Численное исследование коррозионного критерия в зависимости от условий

работы ЦПГ, проведенное в шестой главе, показало, что для условий компрессора КМ-2, его значения нелинейно зависят от влажности и концентрации сероводорода, а его максимальное значение зависит от комплекса всех параметров, а не только от максимальных значений влажности и концентрации сероводорода. Данный результат является новым и еще раз подтверждает сложность происходящих процессов и обоснованность выбранного диссертантом подходом к моделированию процессов изнашивания.

**Вывод 5.** Введение коррозионного критерия в обобщенное уравнение интенсивности изнашивания, выведенное на основе теории размерности, позволило учесть влияние коррозионной составляющей, что, как показал диссертант в экспериментальной части диссертации, является одним из определяющих факторов при изнашивании ЦПГ компрессоров при перекачке газа, содержащего сероводород. Таким образом, диссертантом была получена обобщенная критериальная модель механохимического изнашивания исследуемых ЦПГ. Данный подход обоснован, поскольку находится в ключе апробированных методов моделирования изнашивания механизмов и дополняет имеющиеся модели, что позволяет распространить этот подход на другие схожие трибологические системы. Массив экспериментальных данных по влиянию содержания влаги и температуры масла на интенсивность механо-химического изнашивания элементов ЦПГ компрессора в присутствии сероводорода, полученный диссертантом на установке трения УТ-1, позволил ему в шестой главе, на основе вероятностно-детерминистского подхода, определить численные значения неизвестных параметров критериального уравнения. Сопоставление экспериментальных результатов и результатов, полученных моделированием с использованием критериального уравнения, показал хорошее согласование между ними. Следовало бы отметить, что полученная численная модель применима в области значений входящих аргументов и не может быть достоверно экстраполирована без дополнительных исследований.

**Вывод 6.** Глубокий и всесторонний анализ проблем функционирования газоперекачивающего оборудования позволил диссидентанту обнаружить ряд критических проблем, наиболее важных с точки зрения долговечности оборудования. Помимо изучения механо-коррозии ЦПГ, вызванной попаданием этаноламинов в компрессор, диссидентант исследовал причину попадания этаноламинов в компрессор. Это позволило ему предложить ряд оригинальных, простых и рентабельных технических решений, позволивших значительно снизить вероятность попадания этаноламина в компрессор и его преждевременный выход из строя. Достоверность и обоснованность указанных разработок подтверждается полученными патентами РФ (№ 2303754 и № 2370735). Ожидаемый экономический эффект от внедрения составляет один

миллион двести тысяч рублей в год на каждую установку. Помимо этого диссидентом предложена и запатентована схема привода многоцилиндрового бесшатунного компрессора (патент РФ №2290535), что позволяет устранить проблемы в крейцкопфе и шатунной группе.

**Вывод 7.** Хотя магнитные коллоиды давно применяются для смазывания узлов трения, использование смазок с магнитными присадками в компрессорном оборудовании достаточно ново. В диссертации описано экспериментальное исследование влияния концентрации присадки, давления и напряженности магнитного поля на интенсивность изнашивания и коэффициент трения металлических материалов. Диссидент определил значения параметров, при которых достигается наибольший эффект и рассчитал наиболее рациональную конфигурацию магнитного поля. Аналогично положительные результаты получены диссидентом и при использовании этой присадки к дизтопливу. Однако, на данном этапе практическая значимость применения наноразмерных оксидных наночастиц в качестве присадки к топливу неоднозначна в связи с жесткими санитарными ограничениями на присутствие взвешенных наночастиц во вдыхаемом воздухе. Попадание наночастиц присадки в фильтр выхлопных газов может привести к его преждевременному выходу из строя, а увеличение концентрации наночастиц в воздухе потенциально опасно для здоровья. С другой стороны, использование магнитных коллоидов в качестве присадок к маслу не связано с указанными негативными побочными эффектами. Полученные экспериментальные результаты обоснованы с позиций теории мицеллярных структур и поверхностных слоев, разработанной Дерягиным и Ребиндером. Обоснованность и достоверность выводов подтверждается адекватностью схемы физического моделирования, воспроизводимостью экспериментальных данных и их соответствием современным теоретическим представлениям о смазочной способности магнитных коллоидов, а также согласованностью с результатами других опубликованных работ.

**Вывод 8.** Разработанная технология получения присадок с нанометровыми мицеллярными частицами магнетита и олеиновой кислоты основана на известном методе механического диспергирования в шаровой мельнице с последующей конденсацией на наночастицах магнетита олеиновой кислоты и диспергированием полученных мицелл в дизельном топливе в виде концентрата. Эффективность магнитного коллоида в качестве противоизносной и антифрикционной присадки доказана в ходе экспериментальных исследований с использованием модифицированного трибометра с установленным на нем постоянным или электромагнитом. Разработанная технология и размер наночастиц в интервале 10-100 нм обоснованы теоретическим расчетом динамики мицелл в коллоиде под действием

магнитного поля, выбором оптимальной конфигурации магнитного поля и параметров постоянного магнита.

**Вывод 9.** Содержит описание практической значимости диссертационных исследований.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 42 статьях, в том числе 22 из списка ВАК, и были доложены на 18 научно-практических конференциях.

**Научная новизна полученных результатов работы** заключается в разработке диссидентом научно обоснованных технических и технологических решений, позволяющих значительно увеличить долговечность компрессорного оборудования в условиях загрязнения перекачиваемого газа агрессивными газами за счет применения новых смазочных материалов, прогнозирования интенсивности изнашивания и снижения вероятности попадания в компрессор посторонних жидкостей и конденсированных газов и паров. Наиболее значимые, на мой взгляд, положения научной новизны заключаются в следующем:

- Разработан комплекс технических средств (машин трения, приспособлений), защищенных рядом патентов, и методик исследований процессов трения и изнашивания в ЦПГ в условиях загрязнения перекачиваемого газа сероводородом и попадания в компрессор посторонних жидкостей, позволяющих выявить влияние различных параметров (температура, состав и давление газов, состав смазочных масел, сила магнитного поля и др.) на интенсивность износа и коэффициент трения;
- получены экспериментальные зависимости для коэффициента трения и интенсивности изнашивания элементов цилиндро-поршневой группы компрессоров перекачки природного газа, содержащего примеси сероводорода, воды и метаноламинов, от условий среды в цилиндре при сжатии (температура, давление и состав газов) и условий работы (вид масла и комплекс присадок, концентрация загрязнений в смазочном масле и др.), позволившие установить влияние отдельных параметров на трибологические процессы;
- на основе теории размерности и физического подобия разработана критериальная модель для расчета механохимического износа элементов цилиндро-поршневой группы компрессорного оборудования, в которой введен новый коррозионный критерий, позволяющий учитывать агрессивность среды, и определены численные значения параметров нелинейных уравнений, что позволило внедрить полученную модель на практике;
- разработаны комплексы присадок к смазочным маслам компрессорного оборудования, позволившие значительно улучшить коррозионную стойкость

элементов цилиндро-поршневой группы, а также снизить коэффициент трения и интенсивность изнашивания;

- разработаны присадка к смазочному маслу компрессорного оборудования на основе магнитного коллоида с мицеллярными частицами нанометрового диапазона, а также технология ее производства, позволившие значительно, в 1,5...2,0 раза, снизить интенсивность изнашивания при использовании отечественных минеральных масел;
- разработаны и запатентованы технические решения, позволяющие значительно снизить вероятность попадания в цилиндры компрессора посторонних жидкостей и загрязняющих веществ, внедрение которых имеет экономический эффект более миллиона рублей на установку.

### **Значение выводов и рекомендаций, полученных в диссертации, для науки и практики**

Научные исследования и практические разработки, представленные в диссертации, имеют важное значение не только с точки зрения понимания механохимического износа в узлах трения в присутствии агрессивных газов, но и для практического использования в компрессорном оборудовании. Разработанные доктором наук композиции присадок и магнитные смазки могут применяться не только в компрессорном оборудовании, но имеют перспективу для внедрения в других секторах, не только в России, но и за рубежом. Предложенные автором диссертации решения достаточно аргументированы и обоснованы полученными новыми экспериментальными данными, а также оценены по сравнению с другими известными решениями. Существенное значение для науки и практики имеют следующие полученные результаты:

- разработан комплекс оборудования и методик для физического моделирования трибологических процессов цилиндро-поршневой группы в совокупности с экспресс анализом смазочного масла (атомно-абсорбционного, атомно-эмиссионного и рентгенофлуоресцентного анализа), позволяющие определять влияние параметров среды (температура, давление и состав газов) и условий работы (состав смазочных масел, комплекс присадок, концентрация загрязнений в смазочном масле) на коэффициент трения и интенсивность изнашивания в динамике, во время эксперимента или натурного измерения;
- экспериментально установлено количественное влияние примесей воды, этаноламинов и давления сероводорода на интенсивность изнашивания цилиндро-поршневой группы компрессора при различных композициях смазочных масел;

- разработан коррозионный критерий и получена численная критериальная модель, учитывающая агрессивность среды и показавшая удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными, для расчета механо-химического изнашивания цилиндро-поршневой группы;
- разработан комплекс присадок к минеральным и синтетическим маслам на основе полиолефинов, позволивший снизить интенсивность изнашивания цилиндро-поршневой группы компрессоров в агрессивной среде;
- разработана, запатентована и апробирована противоизносная присадка на основе магнитного коллоида с размером мицелл в диапазоне от 10 до 100 нм, позволяющая снизить интенсивность изнашивания базового минерального масла в 1,5...2,0 раза;
- разработаны и запатентованы технические средства, предотвращающие попадание конденсата и жидкого абсорбента в компрессор, что значительно повышает ресурс работы компрессора.

На практическую значимость его разработок указывает интенсивная патентная деятельность доктора физико-математических наук, который получил 16 патентов РФ в период с 2002 по 2015 годы. Часть этих патентов внедрена на Первомайском судоремонтном заводе (г. Астрахань), ООО Газпром, ОАО ЦНИИА (г. Астрахань), ОАО «Танеко» (г. Нижнекамск), ООО «Астраханьгазпром», о чем свидетельствуют акты, приведенные в приложении. Кроме того, разработки доктора физико-математических наук использованы в учебном процессе по направлениям 26.05.06, 26.03.01, 13.03.01, 23.03.01 и 23.03.03 в Астраханском государственном техническом университете. Разработки доктора физико-математических наук отмечены медалями и дипломами международного салона инноваций, других салонов и форумов.

### **Внутреннее единство структуры работы**

Несмотря на широкий охват рассматриваемых проблем, доктору физико-математических наук удалось сохранить внутреннее единство докторской диссертации, нацеленной на решение поставленных задач. Структура докторской диссертации обоснована и логична и отражает наличие последовательного плана исследований, который включает в себя анализ причин отказов рассматриваемого оборудования, обзор имеющихся работ в данной области, постановку задач, теоретические исследования, разработку нового экспериментального оборудования, экспериментальное физическое моделирование, натурные испытания, обобщение и анализ полученных данных, их сопоставление с теоретическими выкладками, разработку практически значимых устройств и технологий, базирующихся на полученных результатах исследования и их внедрение. Кроме того, исследования базируются на непротиворечивой методологической основе, опирающейся на современные

представления о механо-химическом износе и современный уровень развития экспериментальных и теоретических научных средств и методов.

*В первой главе* проанализированы причины выхода из строя цилиндро-поршневой группы компрессоров газоперекачивающего оборудования и обобщено состояние исследований механохимического износа в агрессивных средах и методов динамического анализа изнашивания смазываемых узлов. *В второй главе* детально описаны разработанные и запатентованные устройства и методики исследований, используемые диссертантом в его экспериментальных исследованиях. *В третьей главе* изучаются процессы механохимического изнашивания пар трения с возвратно-поступательным скольжением компрессорного оборудования в условиях загрязнения масла и газа агрессивными примесями (сероводород, вода и этаноламины) с применением теоретического подхода и физического моделирования. Приведены результаты исследования влияния загрязнений на смазочную способность различных масел, использующихся на практике. *В четвертой главе* приведены результаты разработки и апробирования новых композиций присадок, а также выбор наиболее эффективной композиции с позиций снижения интенсивности износа, экономической эффективности и доступности полученного смазочного масла. *Пятая глава* посвящена разработке присадки к смазочному на основе магнитного коллоида с мицеллярными наночастицами магнетита и олеиновой кислоты, а также технологии получения мицелл. Приведены результаты экспериментальной апробации полученных присадок и подбор наиболее эффективной концентрации присадки в базовом минеральном масле. Проведено теоретическое исследование динамики мицелл в масле и разработана эффективная конфигурация системы постоянных магнитов. *В шестой главе* на основе анализа существующих теоретических разработок и описанных в третьей и четвертой главах экспериментальных данных разработана критериальная модель механохимического износа цилиндро-поршневой группы с учетом влияния коррозионного критерия и рассчитаны численные параметры системы нелинейных уравнений. Завершающая *седьмая глава* посвящена описанию разработанной технологической цепочки по предотвращению аварийных ситуаций при эксплуатации компрессорного оборудования и технических средств, разработанных диссертантом.

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).

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

### **Замечания к работе**

1. Хотя в третьей главе автор корректно выбрал для исследования три вида масла, используемого для смазывания компрессорной техники, на мой взгляд, недостаточно внимания уделено анализу различий между маслами с точки зрения химической структуры базового масла. Автор значительный упор сделал на сопоставлении отечественных и импортных сортов масел, не учитывая, что они имеют различную основу. Не вызывает сомнения справедливость выводов автора о более высокой чувствительности к загрязнению водой и сероводородом масла Orites 270 DS, имеющего полиалкилгликольную основу, по сравнению с минеральным маслом (МС-20) и синтетическим полиальфаолефиновым (ХС-40). Однако, эта более высокая чувствительность может быть объяснена с позиций значительно более высокой гидрофильности масла Orites 270 DS. В свою очередь более высокая стоимость масла Orites 270 DS не только связана с импортным происхождением, но и с технологическими особенностями его получения.

2. Диссертант достаточно подробно описал устройство и принцип работы разработанных машин трения, однако из приведенного описания и рисунков остается не совсем ясной схема измерения сил и моментов трения и калибровка измерительных устройств.
3. В третьей главе диссертант на основе систематических экспериментальных исследований убедительно показал негативное влияние даже малых примесей воды и этаноламинов на интенсивность изнашивания металлических материалов. Тем не менее, в диссертации не приведен анализ поверхностей (микроскопия, хим. анализ или другой) пар трения, что не позволяет судить о микроскопических физико-химических процессах изнашивания. Также не приведены экспериментальные доказательства влияния этих примесей на вязкость масла и адсорбцию слоев пленки на поверхности металла.
4. Трудно согласиться с предложенным автором объяснением механизма транспорта сероводорода, абсорбированного на этаноламинах, в зону трения. Согласно диссертанту, пузырьки пены разрушаются за счет вскипания воды при сжатии газа в цилиндре и соответствующем повышении температуры. Диссертант не учитывает, что, согласно диаграмме состояния воды, температура кипения при давлении 6 МПа составляет более 200 С, в то время, как температура в цилиндре не превышает 110 С. Тем не менее, следует согласиться с диссертантом, что именно этаноламины способствуют переносу сероводорода в зону трения при их смешивании со смазочным маслом. Было бы более убедительно, если бы диссертант экспериментально показал увеличение содержания сероводорода в масле с использованием химического анализа.
5. На странице 181 диссертант указывает, что размер частиц порошка магнетита после измельчения составляет  $10^{-8}...10^{-12}$  м. Вызывает сомнение физическая возможность получения частиц размером 0,01 ангстрема.
6. Диссертант продемонстрировал значительный положительный эффект от применения магнитных коллоидных присадок к дизельному топливу на трение и износ деталей двигателя. Однако, перспективы практического применения присадок с наночастицами оксидов железа в дизельном топливе не достаточно проанализированы. Существует серьезный риск засорения фильтра наночастиц выхлопных газов при внесении дополнительных несгораемых частиц. С другой стороны, вынос наночастиц с выхлопными газами в атмосферу может привести к

повышению концентрации наночастиц во вдыхаемом воздухе, что потенциально приводит к серьезным последствиям для здоровья людей и состояния биосфера. В диссертации отсутствует оценка или экспериментальное измерение интенсивности выноса частиц с выхлопными газами, что не позволяет сделать вывод о применимости этой присадки в широкой практике.

7. Есть некоторые замечания по стилю оформления, в частности: не все формулы пронумерованы, что несколько затрудняет работу с ней.

**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, в которой решена научная проблема, имеющая важное научное и хозяйственное значение и обладает научной новизной. Работа актуальна для газоперерабатывающих заводов в Российской Федерации и имеет серьезные экспортные перспективы. В работе изложены диссидентом теоретические и экспериментальные закономерности, описывающие влияния различных факторов на механо-химическое изнашивание цилиндро-поршневых групп компрессоров в условиях загрязнения агрессивными продуктами (сероводород, вода и этаноламины), на основе этих исследований диссидент предложил комплекс мер, технологий и устройств, в том числе новые композиции смазочных масел, присадки на основе магнитных коллоидов, а также методы и устройства, предотвращающие загрязнение смазочных масел посторонними жидкостями и конденсатом.

Содержание диссертации корректно изложено в автореферате и в опубликованных по теме диссертации 58 работах, в том числе 22 публикации в рецензируемых изданиях, включённых в рекомендуемый список ВАК Минобрнауки. Апробация работы подтверждена выступлениями диссидентата на конференциях и внедрением разработок. У оппонента нет оснований считать, что диссертация не была выполнена самостоятельно. Она соответствует

паспорту специальности 05.02.04 «Трение и износ в машинах». В работе имеются акты эксплуатационных испытаний и внедрения разработок автора.

В связи с вышеизложенным не сомневаюсь, что рассматриваемая диссертационная работа весьма актуальна, обладает научной новизной, имеет теоретическую и практическую значимость, и полностью отвечает требованиям п. 9, 10 и 11 Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 02.08.2016г.) «О порядке присуждения учёных степеней»: является научной квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований разработаны новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в увеличение долговечности и эффективности компрессорного оборудования газоперерабатывающих заводов, а её автор, Перекрестов Аршавир Петрович, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.02.04 – Трение и износ в машинах.

Официальный оппонент  
Невшупа Роман Александрович,

Научный сотрудник Института строительных наук им. Эдуардо Торроха.  
Испанский высший совет по научным исследованиям, доктор технических наук

25 сентября 2017 года

Институт строительных наук им. Эдуардо Торроха, Испанский высший совет по научным исследованиям (Instituto “Eduardo Torroja” de ciencias de la construcción, Consejo Superior de Investigaciones Científicas)

**Адрес:** Испания, 28033, г. Мадрид, ул. Серрано Гальваче, д. 4. (C/Serrano Galvache 4, Madrid 28033, Spain). **Тел:** +34(91) 3020440

Подпись Р.А. Невшупы заверяю

The signature of R. Nevshupa is true

Начальник отдела кадров

Alfonso Vargas Sampedro

