

УДК 53.083(430.1)

П. Б. Герике

АНАЛИЗ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В рамках проведения процедуры экспертизы промышленной безопасности и диагностирования технических устройств, эксплуатирующихся на опасных производственных объектах, учеными и специалистами ИУ СО РАН и ФГБОУ ВПО КузГТУ выполнен вибродиагностический контроль оборудования ряда предприятий угольной и горнорудной промышленности Кузбасса.

На примере диагностики технического состояния дизельных силовых агрегатов нами рассматриваются вопросы формирования виброакустических характеристик ДВС и особенности проведения расширенного анализа параметров вибрации, выявления типовых дефектов оборудования.

Анализ параметров вибрации – единственный метод неразрушающего контроля, позволяющий без длительного простоя техники определить фактическое техническое состояние динамически работающего агрегата [1, 2]. Именно поэтому вибродиагностика является обязательной процедурой при проведении экспертизы промышленной безопасности технических устройств.

В ходе выполнения данной работы диагностические исследования проводились на 5 буровых установках серии DML в течение двух лет. Кроме того, выполнялись обследования автомобилей БелАЗ, автогрейдеров и погрузчиков, гидравлических экскаваторов Volvo, всего около 15 единиц техники с интервалом измерений 1-3 года. На примере этой выборки рассмотрены вопросы выявления наиболее распространенных дефектов ДВС методом контроля по параметрам механических колебаний.

Оценка технического состояния дизельных двигателей методом вибродиагностики осуществлялась в расширенном до 7-10 кГц частотном диапазоне. Исследования виброакустических характеристик ДВС проводились с применением методов прямого спектрального анализа, синхронного накопления, анализа временной реализации, фильтрации сигнала. Непосредственно сами измерения параметров вибрации выполнялись как на холостом ходу ДВС, так при максимальном крутящем моменте и при максимальной частоте вращения коленчатого вала двигателя.

Обобщая результаты проведенных исследований, можно заключить, что наибольшее распространение на мощных промышленных дизельных двигателях получили следующие типы неисправностей и повреждений:

- нарушение жесткости системы;
- износ элементов поршневых групп;
- нарушения в системе подачи и распределения топлива;
- повреждения подшипников коленчатого вала;
- дефекты центровки силовых установок;
- неуравновешенность деталей коленчатого и/или распределительного вала;
- нарушение режима и качества смазки.

Исследования особенностей анализа повреждений элементов навесного оборудования ДВС являются предметом отдельной работы, здесь же без претензий на полноту освещения рассматриваются только вопросы диагностики технического состояния двигателей, оставляя за скобками дефекты генераторов, вентиляторов систем охлаждения, ременных передач, помпы и т.п.

Рассмотрим несколько примеров выявления типичных неисправностей дизельных двигателей методом контроля по параметрам механических колебаний.

Рис. 2 иллюстрирует достаточно распространенный дефект монтажа - нарушение соосности дизельного двигателя и роторного компрессора буровой установки. За непродолжительный период времени этот дефект приводит к значительному росту величин параметров вибрации, эксплуатационный ресурс подшипников уменьшается в несколько раз, выходят из строя соединительные муфты, происходит общее нарушение жесткости системы и т.д.

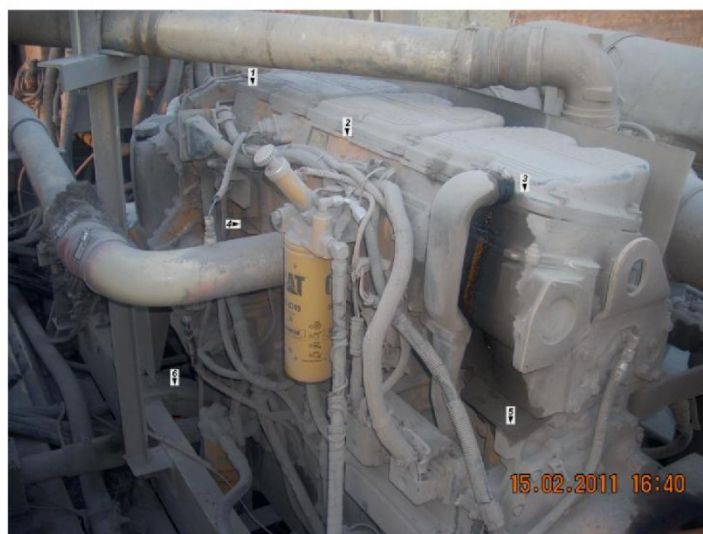


Рис. 1. Схема проведения замеров параметров вибрации на дизельном двигателе Caterpillar 3406С, установленном на буровой установке DML

Разнообразные дефекты подшипников, используемых в конструкции ДВС, также являются распространенной неисправностью силовых установок.

На рис. 3 приведена спектральная обработка полигармонической волны вибрации, полученной в непосредственной близости от коренного подшипника дизельного двигателя Caterpillar с группой выделенных «подшипниковых» частот (см. схему проведения измерений рисунок 1, точка 5). Анализ составляющих спектра позволил сделать вывод о наличии сразу нескольких развитых дефектов – изменении формы тел качения и повреждении внутреннего кольца подшипника.

С точки зрения анализа параметров виброакустической волны, наиболее эффективным считается применение сразу группы методов контроля по параметрам механических колебаний. Комплексный диагностический подход, как правило, включает в себя метод прямого спектрального анализа, синхронное накопление, анализ огибающей и эксцесс. Кроме того, при диагностировании мощных дизельных двигателей, эксплуатирующихся в условиях угольной промышленности, к этой груп-

пе методов целесообразно добавить анализ вейвлет-преобразования и временной реализации. Именно такое сочетание методов вибродиагностики обеспечивает возможность максимально точной интерпретации полученных результатов с указанием степени развития того или иного дефекта, четкого формулирования рекомендаций по ремонту техники, разработки достоверных прогнозных моделей развития типовых повреждений двигателей внутреннего сгорания, работающих на тяжелом топливе [1, 2].

Еще один пример полигармонической волны вибрации, генерируемой мощным работающим дизельным двигателем, представлен на рисунке 4. Анализ измеренных характеристик позволил выявить асимметрию временных разверток механических колебаний в районе коренного подшипника. Амплитуда общего уровня сигнала по параметру виброускорения составляет $A=84 \text{ м/с}^2$, что превышает предельно допустимую величину $[A]=4g$ [3, 4]. Частота ударных импульсов соответствует удвоенной частоте вращения коленчатого вала, причина данного явления заключается в износе шлицов вала привода вентилятора.

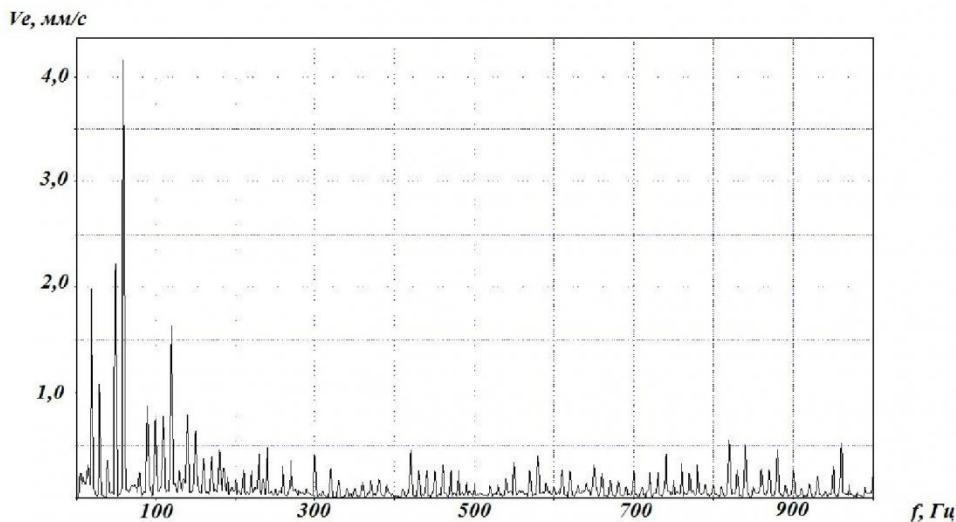


Рис. 2. Нарушение центровки ДВС с компрессором, ярко выраженное нарушение жесткости системы (буровая установка DML-1200).

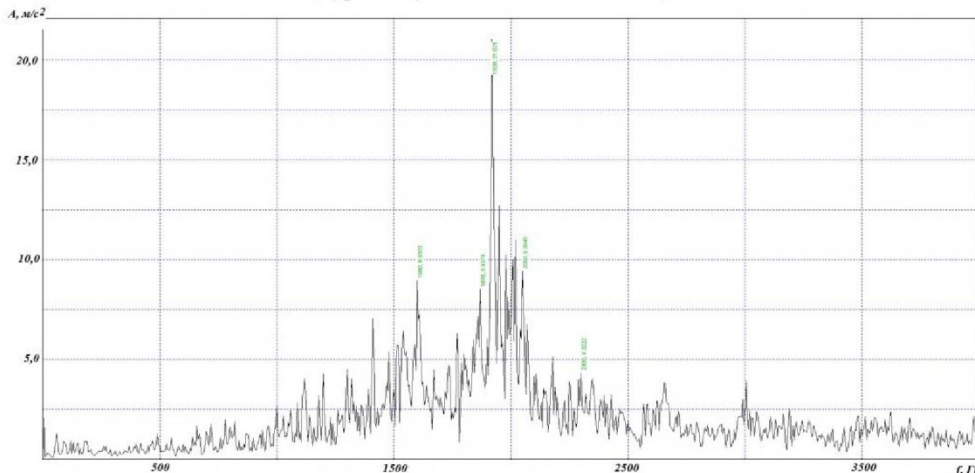


Рис. 3. Развитие дефекта подшипника коленчатого вала ДВС Caterpillar, общий уровень $A=63,6 \text{ м/с}^2$.

После устранения выявленного дефекта техническое состояние двигателя оценивается по параметрам механических колебаний как удовлетворительное; уровень остаточного удельного дисбаланса не превышает допустимого значения. Анализ вибрационных процессов не выявил нарушений в системе подачи и распределения топлива и подтвердил равномерное распределение мощности по цилиндрам.

Говоря об исследовании виброакустических характеристик двигателей внутреннего сгорания нельзя не сказать о сложностях проводимого анализа, зачастую являющихся определяющими при выборе методов и средств проведения контроля и технического диагностирования ДВС. С точки зрения анализа параметров полигармонической волны наиболее всего диагностику затрудняет отсутствие априорной информации о конструктивных особенностях двигателя и трудоемкость проведения контроля на различных режимах его работы, а также сложность доступа к измерительным точкам.

В целом, для ДВС характерно, что рабочие процессы в различных секциях происходят в разные моменты времени, поэтому для интерпретации колебательного процесса, связанного с работой отдельной секции или элемента, целесообразно применение методов фильтрации (временной селекции). Любое изменение в работе двигателя (момент впрыска, нарушения в работе ГРМ, износ поршневых колец и т.д.) влечет за собой изменение генерируемых этими элементами импульсов по фазе, амплитуде и длительности. Принято считать, что для временной селекции этих импульсов наиболее благоприятным режимом является работа двигателя с минимально устойчивой частотой вращения коленчатого вала [5]. Однако, для получения полных результатов, в ходе выполнения данного исследования проводились полные диагностические обследования, которые включают в себя проведение измерений виброакустических характеристик на всех режимах работы агрегата с

использованием всех возможностей аппаратуры для обработки сигнала.

Пример комплексного подхода к диагностике технического состояния сложных объектов проиллюстрирован рис. 5. В данном случае объектом диагностирования послужил дизельный двигатель ЯМЗ-240. Результаты проведенного контроля методом прямого спектрального анализа, анализа временной реализации и вейвлет-обработки исходного сигнала позволили выявить неравномерное распределение мощности вследствие нарушения режима подачи топлива в цилиндры. Кроме того, именно результаты комплексного анализа параметров виброакустической волны позволили выявить на начальной стадии развития зарождающиеся дефекты подшипникового узла коленчатого вала, расположенного со стороны маховика. Согласно межотраслевой нормативной документации [3, 4] состояние двигателя было признано недопустимым, по результатам проведенного контроля силами эксплуатирующей организации произведен капитальный ремонт силовой установки, включая замену топливного насоса высокого давления.

Таким образом, обобщая вышесказанное, необходимо подчеркнуть тот факт, что именно результаты **комплексного диагностического подхода** позволяют:

- извлечь максимум полезной информации из виброакустического сигнала;
- сформулировать точные диагностические признаки дефектов исследуемого оборудования и критерии предельно допустимого состояния техники;
- минимизировать недостатки и ограничения применяемых методов диагностики.

Определение предельных характеристик допустимого состояния горной техники, разработка математических моделей развития типовых дефектов и формулирование точных диагностических правил для уникального оборудования угольной промышленности является предметом

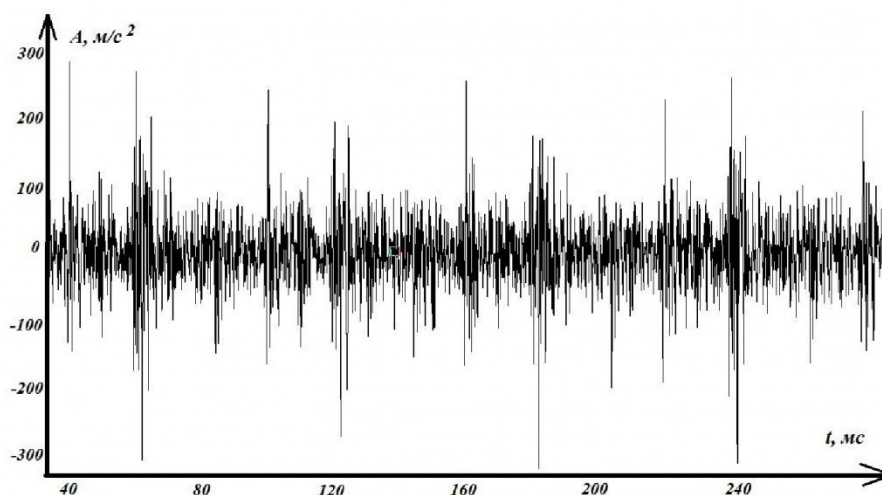


Рис. 4. Полигармоническая волна вибрации, записанная в непосредственной близости от коренного подшипника двигателя ЯМЗ-240 НМ2.

исследования ученых Сибирского отделения РАН. Обобщая результаты выполненных диагностических работ, следует отметить факт нахождения значительной части оборудования в недопустимом техническом состоянии. Это является определяющим фактором, напрямую оказывающим негативное влияние как на экономические показатели работы предприятия, так и на безопасность обслуживающего персонала.

Отдельного рассмотрения заслуживает вопрос нормирования уровней вибрации ДВС. Если вопросы общей оценки технического состояния промышленных дизельных двигателей достаточно хорошо проработаны [3, 4], то оценка уровней по полосам (критерии для построения спектральных масок) и анализ гармонической активности спектрального представления полигармонической волны изучены не достаточно хорошо. Необходимо продолжить сбор статистической информации по параметрам вибрации двигателей внутреннего сгорания различной конструкции, которая может быть использована для уточнения диагностических правил и разработки математических моделей развития дефектов узлов ДВС.

Кроме того, рассмотренные подходы к диагностике сложных технических систем могут быть применены при внедрении на предприятиях более совершенных форм управления техническим обслуживанием и ремонтом. Собранные в ИУ СО РАН базы данных по параметрам виброакустического сигнала служат платформой для разработки и уточнения критериев предельного состояния техники, и могут быть использованы в качестве научного задела при переходе на систему обслуживания техники по фактическому техническому

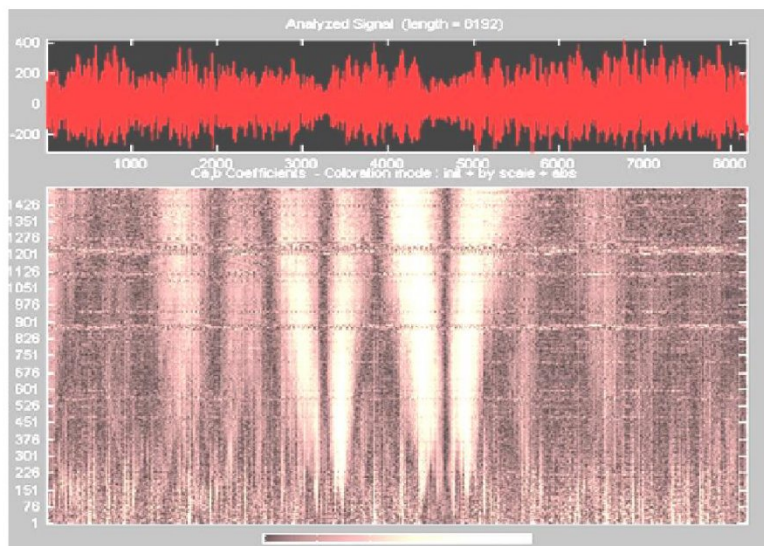


Рис. 5. Волна вибрации, записанная на крышке клапанной коробки двигателя ЯМЗ-240, и результаты ее вейвлет-преобразования.

состоянию.

«В настоящее время необходимо опережающими темпами повышать эффективность производства на базе ускорения научно-технического прогресса..., обеспечивать удовлетворение потребностей в запасных частях к машинам и оборудованию» [6]. В условиях угольной и горнорудной промышленности Кузбасса только система управления техническим обслуживанием по фактическому техническому состоянию позволит в полном объеме решить задачи, связанные с безопасной и эффективной эксплуатацией горной техники. Только с внедрением предложенной системы появится возможность минимизировать аварийные простои технологического оборудования, оптимизировать логистику, складское хозяйство предприятий, затраты на проведение ремонтов. Диагностика сложного технического устройства является единственно возможным способом оценить его фактическое состояние и обоснованно планировать ремонтные мероприятия, тем самым повышая безопасность проведения горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герике Б.Л. Диагностика горных машин и оборудования. Учебное пособие. /Б.Л. Герике, П.Б. Герике, В.С. Квагинидзе, Г.И. Козовой, А.А. Хорешок / Москва, 2012. – 400 с.
2. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 т. под ред.чл.-корр. РАН В.В. Клюева, т.7 – Москва, 2005.–828 с.
3. ГОСТ ИСО 10816-6-95. Оценка состояния машин по результатам измерения вибрации на невращающихся частях. Часть 6. Машины возвратно-поступательного действия номинальной мощностью свыше 100 кВт.
4. VDI 3838:2004 – 05. Messung und Beurteilung mechanischer Schwingungen von Hubkolbenmotoren und -kompressoren mit Leistungen über 100 kW - Ergänzung von DIN ISO 10816-6
5. Вибрация в технике. Т.5. Измерения и испытания. Справочник под ред.М.Н. Генкина – Москва, 1981.–496 с.
6. Клишин В.И. Монтаж, демонтаж, эксплуатация и ремонт горно-шахтного оборудования. Учебное пособие. /В.С. Квагинидзе, Г.И. Козовой, В.И. Клишин // Москва, 2012. – 511 с.

Автор статьи

Герике Павел Борисович
канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник лаб.средств механизации
отработки угольных пластов Института угля СО РАН, доцент каф.
горных машин и комплексов КузГТУ Email: am_besten@mail.ru

ISSN 1999-4125

ВЕСТНИК

КУЗБАССКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2-14

ВЕСТНИК

КУЗБАССКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№2 (102), 2014

Основан в 1997 году
Выходит 6 раз в год
ISBN 5-89070-074-X

Редакционная коллегия:

Антонов Ю.А., к.т.н., Бломенштейн В.Ю., д.т.н. (зам. главного редактора), Голофастова Н.Н., к.э.н., Завьялов В.М., д.т.н., Знишкин Л.С., д.п.н., Исмагилов З.Р., член-корреспондент РАН, д.х.н., Каширских В.Г., д.т.н., Клишин В.И., член-корреспондент РАН, д.т.н., Клубович В.В., академик НАН Беларуси, д.т.н., Ковалев В.А., д.т.н. (главный редактор), Колесников В.Ф., д.т.н., Конторович А.Э., академик РАН, д.т.н., Коротков А.Н., Лесовая Н.К. (отв. секретарь), д.т.н., Мазикин В.П., д.т.н., Малышев Ю.Н., академик РАН, д.т.н., Маметьев Л.Е., д.т.н., Маслеников Р.Р., к.т.н., Нестеров В.И., д.т.н., Першин В.В., д.т.н., Петрик П.Т., д.х.н., Ренев А.А., д.т.н., Тайлаков О.В., д.т.н., Трубочанов А.Д., к.т.н., Угляница А.В., д.т.н., Федяев М.Ю., к.т.н., Хмяляйнен В.А., д.т.н., Цзяо Ви-го, д.т.н., Черкасова Т.Г., д.х.н., Шевченко Л.А., д.т.н., Юй Шен-вэнь, д.т.н.

Журнал включен в "Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук".

Кемерово

© Кузбасский государственный
технический университет
имени Т.Ф.Горбачева, 2014

Адрес редакции: 650099,
Кемерово, ул. Дзержинского 9,
комн. 2100, тел.39-69-28
http: www.kuzstu.ru
e-mail: tma_vt@kuzstu.ru

ГОРНЫЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- К.А. Ананьев, В.В. Аксёнов, А.А. Хорешок, А.Н. Ермаков. Определение зависимости геометрических параметров барабанов разрушения забоя от угла их установки на геоходе 3
- А.Н.Ермаков, В.В. Аксёнов, А.А. Хорешок, К.А. Ананьев. Обоснование требований к исполнительным органам формирования законтурных каналов геохода 5
- М.В.Милованов. Численное решение дифференциального уравнения продольных колебаний буровой штанги станков шарошечного бурения 8
- М.Д. Войтов, Ю.А. Фадеев, Т.Е. Трипус. Распределение напряжений в композиционных трубчатых анкерах 11
- П. Б. Герике. Анализ виброакустических характеристик двигателей внутреннего сгорания 15
- П.В. Буякин. Расчет нагрузок в опорно-поворотном устройстве экскаватора-мехлопаты 19

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

- М.В. Шинкевич, М.С. Пластин. Возможности прогноза и управления метанообильностью очистных забоев 22
- В.Г. Смирнов, А.Ю. Манаков, В.В. Дырдин, З.Р. Исмагилов. Исследования образования и разложения гидратов метана в порах природного угля 27

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

- В.О.Торро, А.В.Ремезов. Возможность установления некоторых количественных требований надёжности 31
- А. В. Рогачков, А. С. Позолотин, А.А. Ренев, П.В. Гречишкин. Стале-минеральная анкерная крепь в сложных горно-геологических условиях угольных шахт 35

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

- А.Н. Смирнов, Н.В. Быкова, Н.В. Абабков, Б.Р. Фенстер. Анализ повреждаемости роторов паровых турбин (обзор) 38
- Л.П. Короткова, С.В. Лацинина, А.В. Рыжикова. Выбор и термическая обработка конструкционных сталей для производства деталей гидроцилиндров крепей 47
- Ф.Н. Притыкин, А.Ю. Осадчий. Кодирование геометрической информации при задании модели кинематической цепи исполнительного механизма андроида 50
- В.Е. Овсянников, В.И. Васильев. Оценка параметров алгоритмов работы операторов технологического оборудования в условиях неопределённости исходных данных 55
- В.Е. Овсянников. Применение вейвлет-анализа для оценки параметров качества поверхностного слоя деталей машин 56
- В.В. Трухин, А.В. Трухин. Исследование влияния добавок титана на обрабатываемость износостойких чугунов 58
- В.А.Коротков, А.А. Дурсенев, К.Л. Квасов. Реализация способа ротационно-абразивной отрезки заготовок на токарных станках в условиях мелкосерийного производства 61
- А.Н. Коротков, Д.В. Видин, А.С. Филиппов. Применение абразивно-притирочных паст с контролируемой формой зерен для различных схем притирки деталей 68

ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

- А.С.Сорокин. К вариационному методу для конечносвязных областей 72
- В. А. Гоголин. Векторный алгоритм решения некоторых задач линейного программирования 75
- А.В. Бирюков, Е.В. Гутова. Аналитическая гранулометрия 77

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

- К.А.Яковлев, А.В. Соловьев. Исследование поверхностных характеристик гидроксида алюминия, полученной твердофазным гидролизом Т.Г.Черкасова, Д.В.Колокольцов, Н.А.Патосин, А.Г. Живаев. Яйский нефтеперерабатывающий завод как один из этапов развития нефтеперерабатывающей отрасли Кузбасса 83
- С.М. Кулаков, Д.В. Торопов. Оперативная оценка эффективности процесса синтеза аммиака в трехполочной колонне 85

ТЕПЛОФИЗИКА

А.Р. Богомолов, Н.В. Тунова, Е.Ю. Темникова. Нестационарный процесс охлаждения каменноугольного полукокса..... 89

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

В.Г. Каширских, А.Н. Гаргаев. Функциональная диагностика двигателя постоянного на основе нейросетевого предиктора 95

И.С. Елкин, М. В. Шлекин. Исследование тепловых процессов в системах из последовательно соединенных проводников 98

В.М. Завьялов, В.В. Ладурко. Применение алгоритмов управления на базе обобщенной электрической машины для управления состоянием асинхронизированной синхронной машины 101

В.Г. Каширских, А.Н. Гаргаев. Функциональная диагностика двигателя постоянного на основе нейросетевого предиктора 104

Е.К.Ецин. О взаимности задач управления состоянием асинхронного электродвигателя 107

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

П.А. Крюков, В.В. Крюкова. Эмпирические подходы к ведению торговых операций на валютном и фондовом рынках 111

Н.В.Осокина, Е.В.Слесаренко. Структурная модернизация как форма реализации экономической безопасности российской экономики 117

Н.Н. Голофастова, Э.В.Савенко. К вопросу об оценке уровня экономической безопасности предприятий машиностроения 122

Т.Г. Королева, А.В. Макк. Проблемы разработки маркетинговой стратегии угледобывающих компаний в условиях нестабильности рынка энергоносителей 124

А.Ю.Тюрин. Моделирование процессов производственно-транспортных систем пищевой промышленности 127

Ю.А. Фридман, Е.Ю. Логинова, Г.Н. Речко. Конкурентоспособность угольного Кузбасса: новые вызовы 130

ЭКОЛОГИЯ И ОХРАНА ТРУДА

С.М. Простов. Физические предпосылки очистки грунтовых массивов от загрязнений электрохимическим методом 136

В.А. Уварова, А. И. Фомин. Шахтные сетки из армированных пластиков и показатели их пожароопасности 140

Л.А.Шевченко, И.Л.Шевченко. Итоги реализации элементов корпоративного управления охраной труда в угольной отрасли Кузбасса 144

В.Г. Михайлов, Н.Ю. Петухова. Диверсификация оценивания устойчивого развития на региональном и локальном уровне 147

А.М. Маценко, М.А. Козина, Е.И. Маценко. Эколого-экономические проблемы добычи, обработки и использования гранита 152

М.К. Карибаева, А.К. Сакошев, О.А. Петрова. Использование природных сорбентов месторождений Восточного Казахстана для очистки различных вод 156

И.А.Басалай, Е.В.Зеленухо. Мероприятия по снижению экологической нагрузки на атмосферный воздух от объектов энергетики 158

И. Б. Катанов, П. Г. Скачилов. О совершенствовании технологии и повышении безопасности взрывных работ при увеличении вместимости ковша экскаватора 161

И.Б. Катанов, Г.Н. Роут. Снижение сейсмического воздействия массовых взрывов разреза «Заречный» на подземные выработки шахты «Талдинская-Западная-2» 165

И.В. Гладких, Е.П. Волькина. Техногенные сырьевые ресурсы Кемеровской области для производства огнеупорных и теплоизоляционных материалов 170

В.А. Уварова, А. И. Фомин. Экологическая безопасность химических ампул анкерного крепления 174

А.В. Колмаков, В. А. Колмаков. Прогноз интерактивных тепловых потоков для кондиционирования атмосферы поверхностных зданий и карьеров 177

В.А. Колмаков, М.В. Чередниченко. Экологические проблемы при использовании шахтного метана 179

В.А. Портола, Н.Л. Галсанов. Оценка эффективности тушения скоплений угля различными хладагентами 181

РЕФЕРАТЫ 186

СПИСОК АВТОРОВ 198

Ответственный редактор -
к.ф.-м.н., профессор кафедры
прикладных информационных
технологий КузГТУ
- М.А.Тынкевич

Дизайн обложки -
Ю.Е.Волчков, Д.А. Бородин

Подписано к печати 17.03.2014

Формат 60×84 /8.

Бумага офсетная.

Печать офсетная.

Гарнитура Таймс.

Уч.-изд. л. 20.

Тираж 150 экз.

Заказ 105

Кузбасский государственный
технический университет
им. Т.Ф. Горбачева
650000, Кемерово,
ул. Весенняя, 28.

Издательский центр УИП КузГТУ

650000, Кемерово,
ул. Д.Бедного, 4а

Лицензия на издательскую
деятельность ИД № 06536