

На правах рукописи

Ваганов Александр Иванович

УСТРОЙСТВА ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ОБЪЕКТАМИ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ ИЗМЕРЕНИЙ

05.13.05 - элементы и устройства вычислительной техни-
ки и систем управления

05.13.07 - автоматизация технологических процессов и
производств в промышленности

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Диссертация в виде рукописи

Работа выполнена на кафедре автоматизации теплоэнергетических процессов Одесского политехнического университета

Научный консультант - доктор технических наук,
профессор Тодорцев И. К.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Джагунов Р. Г.

- доктор технических наук,
профессор Власенко А. А.

- доктор технических наук,
профессор Ястребенецкий М. А.

Ведущая организация - Одесский припортовый завод

Защита состоится "23" Декабря 1993 г. в 17 часов
на заседании специализированного совета Д 068.19.01 при
Одесском политехническом университете (270044, г. Одесса,
проспект Шевченко, 1)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан "16" ноября 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

Ю. С. Ямпольский

ЛННБ України ім. В. Стефаника



00802860 (0)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. Быстрые темпы развития химической технологии выдвигают на первый план задачу обеспечения эксплуатационной надежности и повышения эффективности эксплуатации основного и вспомогательного оборудования химических производств, так как отказ отдельных видов оборудования может привести к ухудшению качества, прекращению выпуска продукции и возникновению аварийных ситуаций.

В системе мероприятий, направленных на решение этих проблем, важная роль отводится разработке эффективных методов и средств технической диагностики и систем управления сложными химико-технологическими объектами.

В химической и металлургической промышленности стран СНГ получили широкое распространение высокоинтенсивные и металлоемкие химические реакторы, которые позволяют за счет применения активной гидродинамической обстановки и высокотемпературной обработки материалов интенсифицировать различные технологические процессы. Использование в химических реакторах высокоскоростных газовых потоков в сочетании с высокой температурой процесса и термохимической обработкой материалов в расплавленном виде повышает эффективность проведения технологических процессов и создает серьезные трудности в получении объективной непрерывной информации об основных технологических параметрах. Эти трудности обусловлены высокой скоростью газового потока, высокой температурой внутри реактора; наличием в газовой среде агрессивных продуктов реакции; каплей расплава и пыли и наличием расплава на стенках реактора. Такие условия измерений исключают применение традиционных средств контроля параметров технологического процесса и создание эффективных систем управления. Определяющим в этом случае становится субъективизм обслуживающего персонала, который оценивает различные технологические ситуации визуально или "на слух".

Отсутствие эффективных устройств диагностики и систем управления химическими реакторами с экстремальными условиями измерений приводит к многочисленным аварийным ситуациям, снижению их производительности, ухудшению качества готового продукта и увеличению потерь перерабатываемого сырья. Поэтому проблема разработки теории и практики использования новых нетрадиционных методов и устройств диагностики и управления объектами с экстремальными условиями измерений имеет актуальное научное и народно-хозяйственное значение.

Работа выполнена в соответствии с отраслевыми координационными планами на предприятиях химической промышленности (Джамбулский суперфосфатный завод, Кингисеппское ПО "Фосфорит"; Сумское ПО "Химпром") и цветной металлургии (ПО "Никель" концерна "Норильский никель").

ЦЕЛЬ РАБОТЫ - разработать научно-технические основы диагностики и автоматизации химических реакторов с экстремальными условиями измерений; получить новую информацию об особенностях проведения технологических процессов в реакторах такого типа и на этой основе создать новые способы и технические средства для диагностики и управления, позволяющие повысить производительность высокоинтенсивных химических реакторов, снизить удельные расходы топлива, потери сырья, обеспечить безопасность эксплуатации реакторов, улучшение качества готового продукта и условий труда обслуживающего персонала.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА: Для широко распространенных в химической промышленности и цветной металлургии химических реакторов различного типа, в которых для интенсификации технологических процессов используется активная гидродинамическая обстановка и высокотемпературная обработка материалов, доказана целесообразность использования в системах диагностики и управления виброакустических источников, которые генерируются газовыми потоками и процессом сжигания топлива. Это позволяет впервые на основе использования новых источников информации решить задачу разработки эффективных устройств виброакустической диагностики и систем управления широким классом химических реакторов: циклонными реакторами, циклонными печами для сжигания жидкой серы, кислородными вертикальными конвертерами для производства черновой меди.

Разработаны научные основы использования в системах диагностики и управления химическими реакторами информативных источников шума и вибрации (аэродинамического шума газовых струй, шума процесса горения, вихревого акустического тона закрученных потоков, собственных колебаний элементов конструкции и оболочек химических реакторов), позволяющие по надежно измеряемым косвенным параметрам идентифицировать состояние технологического процесса.

Разработаны математические модели основных виброакустических источников, сопровождающих работу химических реакторов, позволяющие прогнозировать изменения в виброакустических сигналах при появлении различных нарушений технологического процесса и выб-

рать диагностические признаки, однозначно связанные с условиями функционирования реакторов.

Предложены новые методы оценки технологических параметров промышленных химических реакторов, включающие измерение тангенциальной скорости закрученного потока в циклонных реакторах и центробежных форсунках, скорости сверхзвуковой кислородной струи на выходе из фурмы конвертера, интенсивности процессов горения, оценку состояния внутренних поверхностей реакторов с защитной гарнисажной футеровкой, что впервые позволило достоверно определять моменты отклонения режимных параметров химических реакторов от оптимальных значений.

Разработан комплекс оригинальных диагностических устройств для систем управления химическими реакторами с экстремальными условиями измерений: микрофонный зонд для контроля акустических параметров высокотемпературного закрученного потока, многоканальное аналоговое устройство для регистрации виброакустических параметров и амплитудной селекции сигналов; анализатор спектра с сигнатурным классификатором; устройство для спектрально-ковариационного анализа шумов; устройство для определения среднеинтегральной частоты виброакустического сигнала и сигнала с максимальной амплитудой в заданном диапазоне частот; позволяющих реализовать различные принципы управления химическими реакторами.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований информативных возможностей виброакустических сигналов сложных химико-технологических объектов разработаны новые способы управления технологическими процессами в химических реакторах с активной гидродинамической обстановкой, обеспечивающие безопасность и повышение эффективности их эксплуатации.

Проведенные исследования позволили на основе теоретического и экспериментального обобщения решить крупную научную проблему интенсификации технологических процессов в химических реакторах с активной гидродинамической обстановкой, широко используемых в народном хозяйстве для производства кормовых фосфатов, минеральных удобрений, серной кислоты, меди и никеля.

НА ЗАЩИТУ ВНОСЯТСЯ следующие научные положения и результаты:

- концепция диагностики и управления химическими реакторами с экстремальными условиями измерений по параметрам информативных источников шума и вибрации гидродинамического происхождения и развитие теоретических представлений о процессах генерации шума и вибрации высокоскоростными струями, закрученными потоками, процессом горения топлива и собственными колебаниями элементов

и оболочек реакторов;

- методические положения и практические рекомендации по выбору диагностических признаков в виброакустических сигналах реакторов, соответствующих типовым технологическим ситуациям;

- научные основы проектирования устройств виброакустической диагностики и систем управления химическими реакторами с экстремальными условиями измерений;

- комплекс оригинальных устройств диагностики для обработки виброакустических сигналов реакторов и выделения обобщенных диагностических признаков, защищенных авторскими свидетельствами;

- новые способы управления технологическими процессами в химических реакторах, реализующие концепцию управления сложными химико-технологическими объектами по параметрам информативных источников шума и вибрации, защищенные авторскими свидетельствами, и результаты комплекса работ по исследованию, разработке и внедрению промышленных систем управления химическими реакторами.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ: На основе предложенной и развитой концепции управления широким классом химических реакторов с экстремальными условиями измерений по виброакустическим источникам информации практически реализована система управления циклонным реактором для производства кормовых обесфторенных фосфатов на Джамбулском суперфосфатном заводе (авт. свид. СССР N 1221500, N 1245891, N 1340819, N 1720729); система управления циклонной печью для сжигания жидкой серы на Кингисеппском ПО "Фосфорит" (положит. решение ВНИИГТЭ о выдаче авт. св-ва по заявке N 4934752/26/039479 от 20.08.92); система управления кислородно-конвертерным процессом получения черновой меди на комбинате "Североникель" (положит. решение ВНИИГТЭ о выдаче авт. св-ва по заявке N 4929519/02/033226 от 18.03.92). Разработанные и внедренные системы управления химическими реакторами на основе анализа виброакустической информации могут быть использованы для любых типов циклонных реакторов, применяемых для термохимической обработки полидисперсных материалов, сжигания жидкого топлива или серы; а также кислородно-конвертерных процессов черной и цветной металлургии.

Разработанные оригинальные устройства виброакустической диагностики химических реакторов (авт. св-ва СССР N 1483282, N 1101685, N 1221500, N 1245891, N 1503442, N 1638476, N 1704828, N 1741880, N 1236259, N 1444326) могут быть использованы в системах диагностики и управления различными химико-технологическими, теплотехническими и механическими объектами.

Пакет прикладных программ для расчета циклонных печей для сжигания жидкой серы использован при проектировании новых технологических схем производства серной кислоты на Кингисеппском ПО "Фосфорит" и Сумском ПО "Химпром".

Научные разработки по автоматизации химических реакторов использованы в учебно-воспитательном процессе при обучении студентов в Одесском политехническом институте в НИРС, курсовом и дипломном проектировании.

Автоматическая система управления химическим реактором с применением виброакустических источников информации демонстрировалась на международной выставке "Химия-87" (г. Москва).

Суммарный реальный экономический эффект от внедрения систем управления циклонными реакторами, печами для сжигания жидкой серы, кислородным конвертером для производства черновой меди и пакета прикладных программ для расчета циклонных печей, полученный за счет увеличения производительности агрегатов и снижения себестоимости готового продукта, составил 5 млн. 590 тыс. рублей при долевом участии Одесского политехнического института - 50%.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ: основные результаты исследований и отдельные разделы диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всесоюзном совещании по математическому моделированию и управлению высокотемпературными процессами в циклонных и вихревых аппаратах (1980 г.); II Всесоюзном научно-техническом совещании "Создание и внедрение современных аппаратов с активными гидродинамическими режимами для текстильной промышленности и производства химических волокон (1981 г.); XII Всесоюзной научно-технической конференции "Теория и практика циклонных технологических процессов в металлургии и других отраслях промышленности (1982 г.); I-III Всесоюзной научной конференции "Методы кибернетики химико-технологических процессов" (1984 г., 1987 г., 1989 г.); IV-VI Всесоюзной научно-технической конференции по исследованию вихревого эффекта и его применению в технике (1984г., 1987 г., 1991 г.); IV и V Всесоюзной научно-технической конференции "Математическое моделирование химико-технологических систем" (1985 г., 1988 г.), Всесоюзной научно-технической конференции "Технология сыпучих материалов - Химтехника-86 (1986 г.); Всесоюзной научно-технической конференции "Актуальные проблемы моделирования и управления системами с распределенными параметрами (1987 г.); научно-технической конференции "Проблемы экологии и ресурсосбережения - Экоресурс -;" (1991 г.); VII научно-техни-

ческой конференции "Математическое моделирование и вычислительный эксперимент для совершенствования энергетических и транспортных турбоустановок в процессе исследования, проектирования, диагностирования и безопасного функционирования (1991 г.); республиканском семинаре "Кибернетика и автоматическое управление" Научного Совета АН Украины по проблеме "Кибернетика" (1991, 1992г.).

Результаты выполненных исследований отражены в 49 публикациях, в том числе в 3 брошюрах, 14 статьях, 14 тезисах докладов, 16 авторских свидетельствах и 2 положительных решениях ВНИИГЭС о выдаче авторских свидетельств.

СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ: Работа содержит введение, пять глав, выводы и приложения. Основное содержание работы изложено на 243 страницах машинописного текста с 121 рисунком и 12 таблицами. Библиография включает 208 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ПЕРВАЯ ГЛАВА посвящена изучению состояния проблемы диагностики и управления высокотемпературными химическими реакторами с активной гидродинамической обстановкой, которая обеспечивается в случае применения закрученных потоков или сверхзвуковых струй.

Закрученный поток является основой для проведения равнообъемных технологических процессов в реакторах циклонного типа. Наиболее распространенными из них являются циклонные реакторы для термохимической обработки полидисперсных материалов, которые используются в химической промышленности для получения кормовых обезфторенных фосфатов, в черной и цветной металлургии, — для кислородно-взвешенной плавки медных концентратов, возгонки редких металлов и получения синтетических шлаков.

Вторым, широко распространенным в промышленности типом циклонных реакторов, является реактор, в котором перерабатываемый продукт подается в закрученный поток в распыленном виде. К ним относятся циклонные печи для сжигания жидкой серы в производстве серной кислоты, циклонные печи для сжигания сточных вод и фосфорных шламов, циклонные предтопки для сжигания мааута.

В случае необходимости перемешивания большой массы расплава и организации интенсивного протекания в расплаве химических реакций в металлургической промышленности широко используется третий тип высокотемпературного реактора с активной гидродинамической обстановкой, — кислородный вертикальный конвертер (КБК).

В КВК интенсификация гидродинамического режима достигается путем применения сверхзвуковой струи кислорода, которая за счет высокой скорости глубоко проникает в расплав, обеспечивает его перемешивание и интенсивное протекание реакций окисления как в ванне расплава, так и реакционной зоне агрегата.

Выделенные три типа высокотемпературных химических реакторов с активной гидродинамической обстановкой обеспечивают проведение большинства технологических процессов термохимической обработки сырья и расплава, сжигания жидких продуктов, что обусловило их выбор в качестве основных объектов для разработки научно-технических основ диагностики и автоматизации химических реакторов с экстремальными условиями измерений: исследование циклонных реакторов проведено на примере процесса гидротермического обесфторивания фосфатов; циклонных печей, - на примере процесса сжигания жидкой серы; КВК, - на примере процесса получения черновой меди из никельсодержащих медных штейнов.

Основной проблемой при решении задач диагностики и управления такими реакторами являются экстремальные условия измерений, которые исключают возможность применения традиционных средств контроля. Наличие на стенках циклонных реакторов и КВК гарнисажной футеровки исключает возможность введения в их объем преобразователей для измерения прямых параметров (температуры расплава и газа, скорости закрученного потока). Кроме того, в газовой среде присутствуют агрессивные соединения (HF , SiF_4 , SO_2 и др.), пыль, капли расплава, которые в сочетании с высокой скоростью и температурой газового потока являются причиной быстрого выхода из строя защитных чехлов измерительных преобразователей и оптических систем контроля.

Для исследуемых типов реакторов на основе анализа опыта их длительной промышленной эксплуатации выделены основные типы нарушений технологических процессов, подлежащие диагностированию. В циклонных реакторах для термохимической обработки материалов нарушения технологического процесса связаны, в основном, с изменением топологии внутренних поверхностей при настылеобразовании в зоне ввода топливо-окислительной смеси и в зоне сепарации материала, которые значительно ухудшают сепарационную способность циклона. В циклонных печах и предтопках основным фактором, определяющим эффективность технологического процесса, является качество распыливания жидкого продукта центробежными форсунками, при эксплуатации которых возможно самопроизвольное изменение расхода жидкого топлива через форсунку, изменение диаметра выходного сопла

форсунки при его выгорании или шлаковании, шлакование внутренних поверхностей форсунки битумом или коксом. Эти нарушения приводят к возникновению аварийной ситуации ("проливу" жидкого топлива через форсунку) и к неполному сгоранию топлива в объеме печи, что в случае сжигания жидкой серы обуславливает частые остановки оборудования и "отравление" катализатора.

При эксплуатации КВК для производства черновой меди без систем диагностики и управления не удается обеспечить нормальное, безаварийное проведение технологического процесса. Имеют место частые пережоги кислородной фурмы при неправильном выборе ее положения, что может привести к взрывам при попадании воды в конвертер; настлеобразования на фурме; выбросы расплавленной массы при загрузке холодных оборотов на передутую медь; ошибочное определение готовности меди и ее переокисление.

Для разработки научных основ использования в системах диагностики и управления химическими реакторами новых источников информации о появлении описанных выше нарушений проведен анализ известных способов и устройств для диагностики и управления объектами по косвенным параметрам. Показано, что существующие системы косвенного контроля и диагностики химических реакторов с экстремальными условиями измерений не решают задачу получения достоверной информации о возникающих нарушениях технологического процесса вследствие отсутствия системного подхода при разработке диагностических систем, интуитивного выбора диагностических признаков, отсутствия адекватных математических моделей сигналов и комплекса универсальных диагностических средств.

Для успешного решения проблемы интенсификации технологических процессов в химических реакторах с активной гидродинамической обстановкой и обеспечения их безаварийной эксплуатации предложено использовать в системах диагностики и управления новые информативные источники, - шум и вибрацию гидродинамического происхождения, контроль которых не требует введения в объем реактора измерительных преобразователей. При построении устройств диагностики и систем управления химическими реакторами предложено использовать несколько характерных для большинства типов реакторов с активной гидродинамической обстановкой источников шума и вибрации, которые непосредственно связаны с состоянием технологического процесса:

- аэродинамический шум высокоскоростной газовой струи (условия истечения кислородной струи из фурмы конвертера);
- акустический эффект вихревого свистка при течении ваку-

ченного потока (гидродинамические характеристики циклонных реакторов и центробежных форсунок);

- шум процесса горения (интенсивность протекания окислительных реакций в реакционной зоне конвертера);
- собственные колебания элементов химических реакторов (состояние соплового наконечника центробежных форсунок);
- собственные колебания цилиндрических оболочек циклонных реакторов с присоединенной массой гарнисажной футеровки (условия сепарации расплавленного материала в объеме циклонного реактора).

ВТОРАЯ ГЛАВА посвящена разработке методов и устройств диагностики химических реакторов по акустическим характеристикам вращенных потоков.

В циклонных реакторах и центробежных форсунках, которые являются конструктивными аналогами вихревых генераторов звука, характерным источником дискретного шума является вращенный поток (рис. 1). Это акустическое явление связано с неустойчивостью вращенного потока при высокой степени вкрутки и вызывается прецессионным движением выходного вихря вокруг геометрической оси вихревого аппарата, которое является причиной автоколебаний скорости и давления, распространяющихся в окружающую среду в виде акустических колебаний.

На математической модели акустического источника, включающей в себя зависимость безразмерной частоты колебаний (критерия Струхала) от интенсивности вкрутки потока, показано, что взаимосвязь между гидродинамическими (уровень вращательных скоростей в циклонных реакторах, расход жидкости через форсунку) и акустическими (частота колебаний вращенного потока) характеристиками существует линейная взаимосвязь.

Экспериментальные исследования акустических характеристик вращенного потока для проверки адекватности результатов математического моделирования поведения информативного источника шума проведены на физических моделях циклонных реакторов и центробежных форсунок. Результаты физического моделирования показали, что характерный акустический источник наблюдается при изменении в широком диапазоне конструктивных (диаметр пережима, площадь входных сопел циклонного реактора; диаметр выходного сопла форсунки) и режимных (уровень тангенциальной скорости, расход жидкости через форсунку) параметров, а его частота определяется гидродинамическим состоянием объекта.

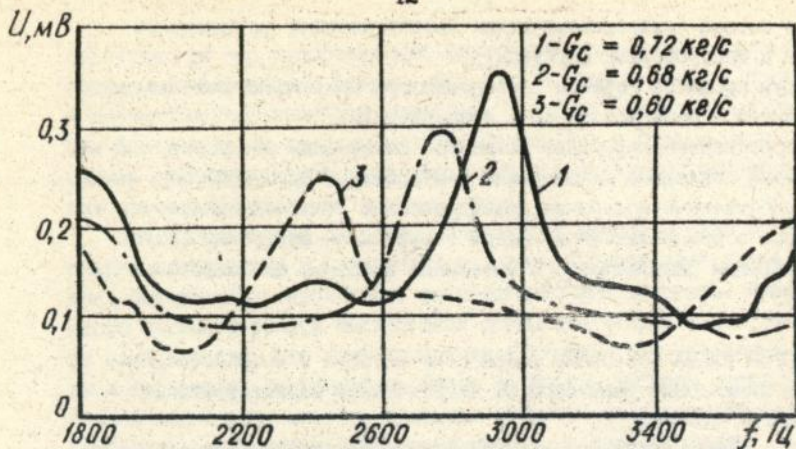


Рис.1 Спектр виброакустических колебаний промышленной форсунки при различных значениях расхода жидкой серы

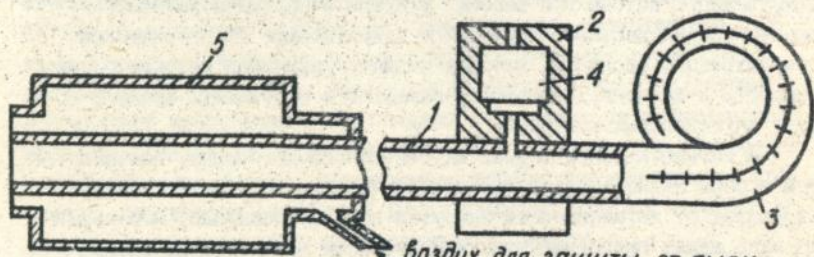


Рис.2 Микрофонное устройство для регистрации параметров акустических колебаний закрученного потока (1-приемная трубка; 2-микрофонная трубка; 3-заглушка; 4-микрофон; 5-глушитель шума воздуха)

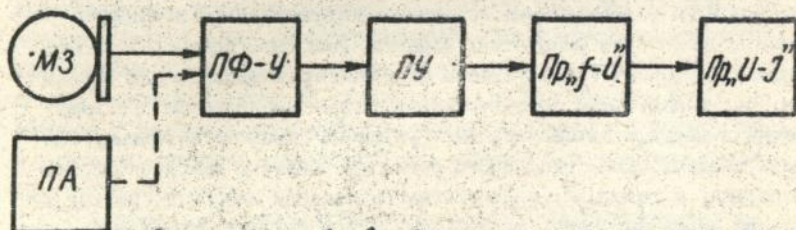


Рис.3 Устройство для контроля частоты акустических колебаний закрученного потока в циклонных реакторах и центробежных форсунках

Характерный акустический тон закрученного потока выделен в спектре шума промышленных установок с циклонными реакторами и центробежными форсунками. Регистрация в промышленных условиях акустических характеристик циклонных реакторов проведена с помощью оригинального микрофонного зонда, который может эксплуатироваться в запыленной высокотемпературной среде (авт. св-ва СССР N 1101685, 1221500, 1245891) и обеспечивает проведение непрерывных акустических измерений без искажения формы и уровня принимаемого сигнала в низкочастотном диапазоне 50-300 Гц; а центробежной форсунки, - с помощью пьезоакселерометра, установленного на ее наружном фланце (рис. 2).

Для разработки устройства обработки акустической информации циклонных реакторов и центробежных форсунок проведены экспериментальные исследования характеристик полеаного акустического сигнала и помехи. Определение отношения "сигнал-шум" произведено с помощью анализатора законов распределения: определена плотность вероятности реального акустического сигнала циклонного реактора в диапазоне частот 60-100 Гц, затем полученный закон распределения промоделирован с помощью генератора сигналов ГЗ-18 и генератора шума Г2-1 смесью периодического сигнала и "белого" шума с отношением "сигнал-шум" по мощности превышающим 10. Поэтому в устройстве для частотной селекции виброакустических сигналов, генерируемых закрученными потоками, при измерении частоты периодического сигнала, смешанного с "белым" шумом, использованы нулевые пересечения случайного процесса, не требующие благодаря своей дискретной природе представления в специальной цифровой форме. Устройство (рис. 3) содержит полосовой фильтр-усилитель ПФ-У для ограничения спектра частот и увеличения отношения "сигнал-шум", пороговое устройство (компаратор) ПУ для определения моментов пересечения виброакустическим сигналом нулевого уровня; преобразователь "частота-напряжение" (Пр"ф-У"), собранный по схеме с гашущим мультивибратором на логических элементах "И-НЕ"; преобразователь "напряжение-ток" (Пр"У-И").

ТРЕТЬЯ ГЛАВА включает разработку методов и устройств диагностики химических реакторов по параметрам аэродинамических шумов: шума высокоскоростной струи и шума процесса горения.

Для построения эффективных устройств диагностики и систем управления и достоверного выбора диагностических признаков в виброакустических сигналах проанализированы физические и теорети-

ческие основы процессов генерации аэродинамических шумов. Аэродинамический шум высокоскоростной струи представлен в виде набора дипольных источников (осциллирующих сфер, совершающих колебательное движение вдоль прямой, проходящей через центр сферы), звуковая мощность которых при числах Маха $0.5 < M < 2$ возрастает пропорционально восьмой степени скорости истечения струи

$$P_0 = K_0 \frac{\rho^2 U^8 D^2}{\rho_0 C_0^3} ; \quad (1)$$

где $K_0 = 3 \cdot 10^{-5}$, ρ, ρ_0 - соответственно плотность струи и окружающей среды; U - скорость истечения струи; D - диаметр струи; C_0 - скорость звука.

Определяющее влияние скорости струи на мощность аэродинамического шума использовано при диагностике условий истечения кислородной струи из фурмы конвертера. Математическая модель шума кислородной струи, используемая для прогнозирования возможного диапазона частот сигнала и изменений его параметров при появлении возмущений в виде настыеобразований на фурме и образования шлака, адаптирована для условий КВК с учетом звукопоглощающих свойств различных сред.

Для случая заглубленного режима истечения кислородной струи мощность аэродинамического шума определялась с помощью выражения

$$P_z = \chi_{ш-г} P_0 \exp[-\alpha_{ш}(z-H)] ; \quad (2)$$

где P_0 - звуковая мощность кислородной струи в месте ее возникновения; $\chi_{ш-г}$ - коэффициент прохождения шума из шлаковой среды в газ; $\alpha_{ш}$ - коэффициент поглощения шума шлаком; z - высота слоя шлака; H - расстояние между торцом фурмы и уровнем металла.

Уравнение (2) позволяет прогнозировать изменение P_z при снижении скорости струи U в случае настыеобразований на фурме и при изменении свойств шлака на заключительном этапе процесса конвертирования.

В спектре корпусного шума конвертера, полученном экспериментальным путем с помощью пьезоакселерометра, установленного на цапфе опорного кольца, аэродинамический шум фурмы наблюдается в расчетном диапазоне частот 4000-6000 Гц с дискретными составляющими, обусловленными механизмом взаимодействия турбулентности со скачками уплотнения в сверхзвуковой струе (рис. 4).

Второй акустический источник в спектре корпусного шума конвертера (150-300 Гц) имеет другой механизм образования, чем аэродинамический шум струи (рис. 4). При сопоставлении в процессе плавки динамики поведения низкочастотного источника шума с ре-

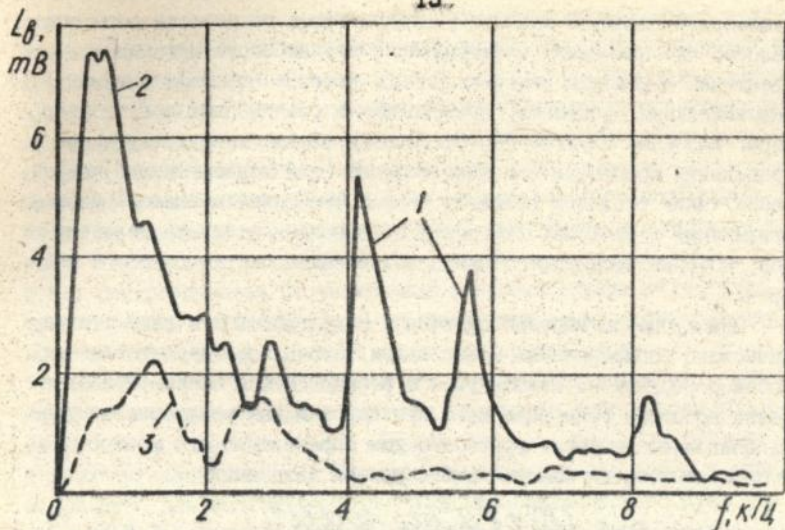


Рис. 4 Информативные источники шума кислородного конвертера (1-шум кислородной струи; 2-шум реакционной зоны; 3-технологические шумы)

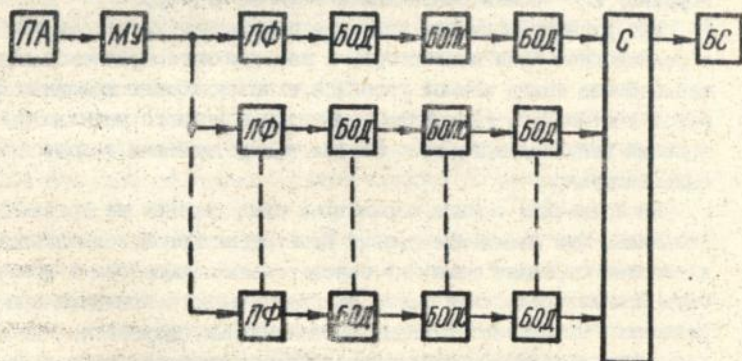


Рис. 5 Устройство для спектрально-ковариационного анализа шумов конвертера (ПА-пьезоакселерометр; МУ-магистральный усилитель; ПФ-полосовые фильтры; БОД-блоки определения дисперсии; БОПС-блоки определения переменной составляющей сигнала; С-сумматор; БС-блок сигнализации)

зультатами газового анализа уходящих газов на диоксид серы оказалось, что изменение интегрального уровня этого источника идентично изменению содержания SO₂, которое отражает динамику окислительных процессов, протекающих в реакционной зоне конвертера. Подобные акустические источники всегда присутствуют при проведении процессов сжигания топлива (для конвертерного процесса таким топливом является сера в сульфидах металлов) и их применение в системах диагностики позволяет избежать недостатков, которые проявляются при использовании систем газового анализа.

Шум процесса горения сульфидов моделировался в виде статистического распределения монополярных источников, представляющих собой периодически сжимающуюся и расширяющуюся сферу. Представление процесса генерации шума при горении как излучение монополя позволяет получить уравнение для определения его мощности $P_{гор}$ и частоты f_m максимального уровня излучения

$$P_{гор} = \frac{(K-1)^2 d^2 \dot{m}_f \dot{m} dU^2}{4 \pi \rho c} ; \quad (3)$$

где K - коэффициент, учитывающий увеличение объема газов при горении; d - коэффициент соотношения "топливо-окислитель"; \dot{m}_f - средняя скорость сгорания единицы объема топлива, \dot{m} - скорость подачи топлива, d - толщина пламени; U - скорость истечения кислородной струи, ρ, c - плотность среды и скорость звука в зоне горения; V - объем реакционной зоны конвертера.

При расчете мощности шума, генерируемого процессом горения в реакционной зоне конвертера, с помощью математической модели теплообмена между ванной расплава и поверхностью холодных оборотов учитывалось изменение температуры жидкого металла при нанесении регулирующего воздействия в виде добавки холодной металлозагрузки.

Качественная оценка параметров шума горения по уравнению (3) показала, что изменение уровня шума реакционной зоны конвертера адекватно отражает динамику окислительных процессов и может быть использовано в качестве диагностического признака при определении начала интенсивных окислительных процессов, хода расплавления холодных оборотов и окончания процесса конвертирования.

Совместное использование двух выделенных источников шума конвертера (аэродинамического шума фурмы и шума реакционной зоны), впервые применяемое в практике диагностики КИ, позволяет распознавать все технологические ситуации, возникающие при проведении

конвертерного процесса получения черновой меди: переход фурмы от свободного истечения струи к заглубленному сопровождается резким уменьшением уровня шума кислородной струи; настлысообразования на фурме приводят к одновременному снижению уровня шума двух источников; ход расплавления холодных оборотов различного состава можно наблюдать по изменению уровня шума реакционной зоны (если обороты не расплавляются, интенсивность окислительных процессов меньше оптимальной на 30-40 %); вскипание расплава сопровождается одновременным увеличением уровня шума фурмы и реакционной зоны; "выход на готовую медь" (содержание серы в расплаве 2.0-2.5%) регистрируется по увеличению среднеинтегральной частоты шума горения; окончание процесса конвертирования соответствует моменту стабилизации уровней шумов двух источников.

Автоматическая регистрация технологических ситуаций в КВК осуществляется с помощью комплекса устройств виброакустической диагностики, обеспечивающих амплитудную селекцию двух информативных сигналов и оценку качественных изменений в спектре шума. Устройство для амплитудной селекции аэродинамического шума фурмы и шума реакционной зоны КВК включает в себя пьезоакселерометр, установленный на цапфе конвертера со стороны привода; магистральный усилитель; набор полосовых фильтров; нормирующих усилителей, амплитудных детекторов и демпфирующих устройств.

Для повышения достоверности процесса диагностики при распознавании ситуации "выход на готовую медь" и момента окончания процесса конвертирования предложено регистрировать качественные изменения спектральной плотности мощности сигнала, а в качестве комплексной характеристики, позволяющей зафиксировать момент перестройки спектра, использовать след ковариационной матрицы T_r и среднеинтегральная частота шума f_R .

В устройстве (рис. 5) для определения следа ковариационной матрицы аэродинамического шума фурмы конвертера (положительное решение о выдаче авторского свидетельства по заявке № 4929519/02/033226 от 18.03.92) виброакустический сигнал $X(t)$ представляется в виде суммы N сигналов $X_i(t)$, каждый из которых действует только в соответствующей i -ой полосе частот; затем находится оценка дисперсий этих сигналов S_i . Если данную процедуру произвести M раз подряд на одном и том же стационарном режиме, можно получить двумерный массив SM , содержащий $N \times M$ элементов.

По аналогии с моментами некоторых двух совместно распределенных случайных величин, находятся моменты $\mu_{1,2,\dots,N}$ относительно средних значений S_1, S_2, \dots, S_N :

$$\mu_{l_1, l_2, \dots, l_N} = E \left\{ (S_1 - \bar{S}_1)^{l_1} (S_2 - \bar{S}_2)^{l_2} \dots (S_N - \bar{S}_N)^{l_N} \right\}. \quad (4)$$

При $l_i = 2$, $l_k = 0$ и $K = i$ получаем из (4) дисперсии величин S_i :

$$\mu_{l_1, l_2, \dots, l_N} = \sigma^2(S_i) = E \left\{ (S_i - \bar{S}_i)^2 \right\}, \quad (5)$$

а при $l_i = l_j = 1$; $l_k = 0$; $K = i$; $K = j$ - ковариации C_{ij} :

$$C_{ij} = \text{cov}(S_i, S_j) = E \left\{ (S_i - \bar{S}_i)(S_j - \bar{S}_j) \right\}. \quad (6)$$

Дисперсии (5) и ковариации (6) собираются в устройстве в виде N -размерной ковариационной матрицы C :

$$C = E \left\{ (S - \bar{S})(S - \bar{S})^T \right\}; \quad (7)$$

где \bar{S} - вектор средних значений; T - знак транспонирования матрицы.

Полученная матрица симметрична, а дисперсии (5) расположены на ее главной диагонали. Указанные дисперсии являются моментами четвертого порядка сигнала $X(t)$:

$$C_{ii} = \sigma^2(S_i) = \mu_4(X_i); \quad (8)$$

при этом для следа T_r ковариационной матрицы можно записать

$$T_r = \sum_{i=1}^N \mu_4(X_i). \quad (9)$$

При диагностике момента окончания процесса конвертирования черновой меди значение T_r при переходе технологического процесса от состояния "выход на готовую медь" к состоянию "медь готова" увеличивается практически в двадцать раз.

Достоверное распознавание состояния технологического процесса в конвертере "выход на готовую медь" обеспечивается с помощью диагностического устройства для определения среднеинтегральной частоты (авт. св-во СССР N 1638476). Устройство реализует обработку шумового сигнала реакционной зоны конвертера в диапазоне частот 150-300 Гц согласно выражению $f_R = \mu / 2\pi\sigma$; где μ - среднеквадратичное отклонение производной выходного сигнала усилителя; σ - среднеквадратичное отклонение выходного сигнала усилителя.

Среднеинтегральная частота шума реакционной зоны конвертера при возникновении ситуации "выход на готовую медь" увеличивает-ся практически скачкообразно на 30-40 Гц.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА посвящена разработке методов и устройств диагностики химических реакторов с экстремальными условиями измерений по параметрам собственных колебаний их элементов и оболочек.

Для целей виброакустической диагностики условий сепарации расплава в объеме циклонного реактора и определения мест возникновения значительных настыеобразований в зоне горелочных устройств и максимальной сепарации материала впервые предложено использовать явление изменения динамических характеристик цилиндрической оболочки реактора в зависимости от величины присоединенной массы гарнисажа. Механизм возникновения нарушений условий сепарации исследован на физической модели циклонного реактора. Установлено, что ликвидация настыеобразований с помощью конструктивных изменений узла ввода топливо-воздушной смеси невозможна из-за гидродинамических особенностей формирования закрученного потока, - возникновения перепада давления на стенках реактора в районе соударения прямоточной и закрученной струй, стимулирующего принудительное движение расплавленного материала к корню факела горелки в зону относительно низких температур, где он застывает, перекрывая часть площади входного сопла. Подобные нарушения могут быть установлены только в случае применения системы диагностики условий сепарации и своевременного изменения при начале процесса настыеобразований тепловой нагрузки реактора.

Оценка особенностей влияния неоднородного характера осаждения гарнисажной футеровки на динамические характеристики корпуса циклонного реактора и возможностей приборного контроля возникающих неоднородностей посредством измерения спектра собственных частот и форм колебаний проведена на математической и физической моделях.

При моделировании корпус циклонного реактора представлялся в виде цилиндрической оболочки конечной длины, ограниченной по торцам с одной стороны крышкой, с другой пережимом; имеющей ребра жесткости и подкрепленной в четырех точках подводами топливно-окислительной смеси. Рассчитываемая оболочка имела слоистую структуру и состояла из внешней стальной обшивки, слоя хроммагнетитового заполнителя, ряда экранных теплопринимающих труб циркуляционного контура с кипящей водой, слоя гарнисажа и пленки расплава. Гарнисаж при моделировании рассматривался как демпфирующий слой переменной величины, а корпус циклонного реактора со стенками сложной структуры, - в виде конструктивно анизотропной квазиоднородной цилиндрической оболочки с присоединенными и подкрепляющими элементами. Адекватная идеализация корпуса циклонного реактора и определение его эффективных жесткостных и инерционных характеристик позволили разработать

методику нахождения собственных частот и форм колебаний оболочки реактора с использованием метода конечных элементов (МКЭ), учитывающего их различную пространственную ориентацию и анизотропию свойств.

На основе анализа результатов математического моделирования колебаний корпуса циклонного реактора и физического моделирования нарушений условий сепарации установлено, что увеличение общего количества пластичного материала приводит к увеличению потерь колебательной энергии в высокочастотной области спектра, причем снижение амплитуды составляющих спектра пропорционально отношению массы пластичного материала к массе оболочки, приходящихся на единицу поверхности.

На математической модели проведен расчет собственных частот и форм колебаний корпуса промышленного циклонного реактора при возникновении нарушений состояния гарнисажной футеровки: при равномерном осаждении гарнисажа амплитуда колебаний оболочки по образующей не изменяется для каждой из исследованных форм. Увеличение массы гарнисажа приводит к росту амплитуды первой и второй формы и снижению амплитуд высших форм в месте присоединения дополнительной массы. Для нахождения размеров панели, на которой следует устанавливать вибропреобразователи системы диагностики условий сепарации, с основной резонансной частотой, равной частоте возбуждающего источника, использован метод пошагового поиска с переменной величиной шага.

На рис. 6 представлен спектр вибрации корпуса циклонного реактора в районе горелочного устройства при нормальной толщине гарнисажной футеровки (1) и ее отсутствии (2). Увеличение массы гарнисажа приводит к потерям энергии колебаний оболочки на средних и высоких частотах исследуемого диапазона. В низкочастотной области наблюдается рост амплитуды первых форм собственных колебаний и некоторое снижение их частот из-за увеличения инерции этой части оболочки (аналогичная картина наблюдается и в зоне сепарации). В ходе экспериментальных исследований на промышленном циклонном реакторе подтверждена гипотеза о возможности диагностики процессов настылеобразований по амплитуде собственных колебаний цилиндрической оболочки.

Диагностическое устройство для амплитудной селекции виброакустических сигналов химических реакторов, используемое при распознавании настылеобразований в объеме циклонного реактора, включает в себя набор пьезоакселерометров и предварительных усилителей, установленных на корпусе объекта диагностики; набор

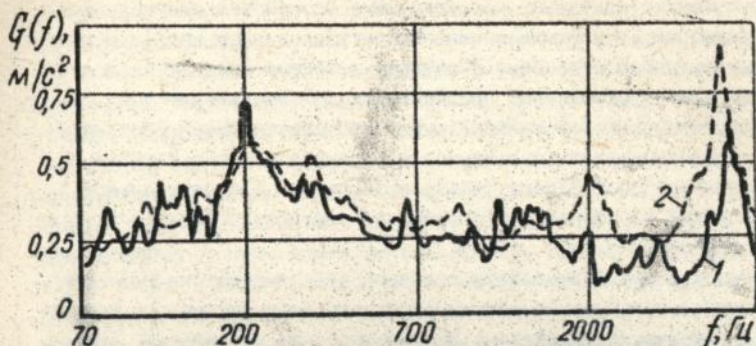


Рис.6 Спектры собственных колебаний корпуса циклонного реактора в районе горелочных устройств при нормальном состоянии гарннсажа (1) и его отсутствии (2)

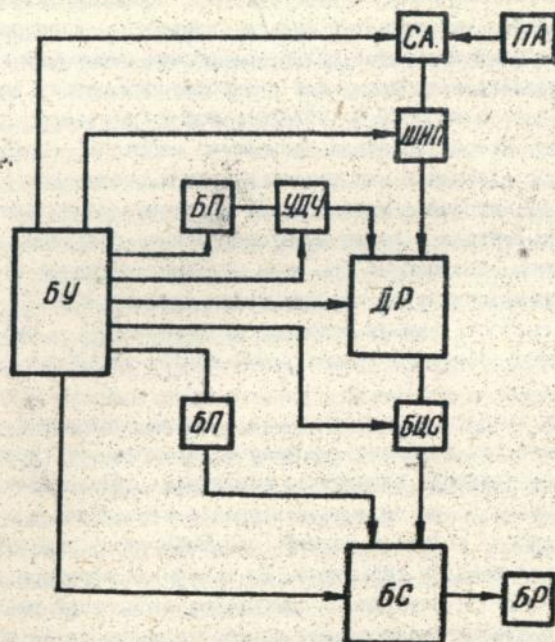


Рис.7 Устройство для спектрального анализа собственных колебаний циклонного реактора

нормирующих усилителей; коммутирующее устройство для подключения фильтров, усилитель с плавным регулированием коэффициента усиления; набор полосовых фильтров; детектор средних значений; демпфирующее устройство; преобразователь "напряжение-ток". Выходной ток, пропорциональный амплитуде спектральной составляющей в заданном диапазоне частот виброакустического сигнала и определяемый настройками фильтров, подается в измерительную схему КСУ-2 и цифровую информационно-диагностическую систему на базе микро-ЭЕМ.

Для повышения достоверности процесса диагностики при амплитудной селекции виброакустических сигналов циклонного реактора разработаны оригинальные диагностические устройства, осуществляющие оценку максимума спектральной плотности сигнала и определение сигнатуры спектра шума.

Устройство для определения максимума спектральной плотности виброакустического сигнала включает в себя полосовой фильтр для ограничения спектра сигнала, преобразователь временного масштаба, узкополосный фильтр, квадратор, интегратор, набор пороговых элементов, блок управления (тактовый генератор и набор делителей частоты) для синхронизации работы всего устройства (авт. св-во СССР N 1704828). Работа основного элемента устройства, преобразователя временного масштаба, состоит из двух этапов. Первый, - это запись исходной реализации сигнала с помощью ОЗУ, второй, - многократное воспроизведение записанной реализации сигнала с различными скоростями, большими, чем скорость записи. Полученный при этом мультипликативный перенос спектра характеризуется коэффициентом сдвига $K_j = v_{счj} / v_0$; где v_0 - скорость записи исходной реализации; $v_{счj}$ - скорость считывания записи, соответствующая j -ому номеру выделенной гармоники спектра.

При многократном ускоренном считывании записанной реализации выделяется требуемое множество гармоник, от низшей к высшей, т. е. вначале записанная реализация считывается с наибольшей скоростью. После окончания процесса считывания последний начинается вновь, но уже с другой (меньшей) скоростью для выделения следующей по порядку гармоники. На выходе интегратора, таким образом, в процессе очередного считывания записанной реализации формируется значение спектральной плотности мощности на соответствующей частоте.

Принцип действия анализатора спектра с сигнатурным анализом (авт. св-ва СССР N 1483282, 1503442) основан на том факте, что

Каждому выделенному состоянию процесса соответствует набор различных спектральных кривых виброакустического сигнала (рис. 7). Возможные значения каждой ординаты, соответствующей одной из фиксированных частот спектральных кривых, принадлежащих одному классу, находятся в пределах некоторого интервала, называемого допусковой зоной. Поэтому все множество спектральных кривых, принадлежащих одному классу состояния процесса, задается набором допусков для значений всех ординат, соответствующих фиксированным частотам и одной спектральной кривой, проведенной, например, через точки, соответствующие нижним границам всех допусковых зон. Отобразив каждый класс спектральных кривых, соответствующий одному из выделенных состояний процесса, в одномерный допусковый образ, можно резко сократить размерность задачи распознавания. Классификация текущего спектра в устройстве осуществляется путем сравнения обобщенного параметра (сигнатуры), полученного путем допускового преобразования и цифровой свертки, с эталонными обобщенными параметрами.

В разработанном устройстве сигналы со спектроанализатора СА, соединенного с пьезоакселерометром ПА, преобразуются в широтно-импульсном преобразователе ШИП в импульсы, длительность которых пропорциональна значениям ординат спектра. Эти импульсы квантуются в дискретизаторе ДР с шагом, задаваемым делителем частоты УДЧ, управляемым блоком памяти БП, в котором сохраняются допуски на значения ординат спектра для нескольких частот. Сигналы с выхода дискретизатора подаются в блок цифровой свертки БЦС и блок сравнения ВС с эталонными обобщенными параметрами, затем на блок регистрации. Блок управления ЕУ выдает тактовые импульсы, синхронизирующие работу всех блоков устройства.

Другим примером практического использования диагностических возможностей явления возникновения собственных колебаний элементов конструкций химико-технологических объектов является диагностика процесса изменения диаметра соплового наконечника центробежной форсунки при его выгорании или шлаковании. Источником возникновения собственных колебаний соплового наконечника форсунки является турбулентный поток жидкости и периодические изменения давления, которые происходят в результате образования вихревых структур за кромкой сопла.

Параметры колебаний соплового наконечника форсунки определены с помощью математической модели, в которой наконечник представляется в виде стержня постоянного сечения с зафиксированным концом. В модели использовано уравнение собственных продольных

колебаний стержня при отсутствии явления затухания. Модель позволяет оценить амплитуду колебаний соплового наконечника и, его частоту при изменении высоты кромки (длины стержня) при выгорании или шлаковании; увеличение диаметра соплового наконечника форсунки приводит к прямо пропорциональному увеличению частоты его собственных колебаний в диапазоне частот 20-25 кГц. Это явление обнаружено при регистрации спектра корпусного шума в ходе экспериментальных исследований виброакустических характеристик центробежной форсунки при распыливании воды и в промышленных условиях. Диагностика процесса изменения диаметра наконечника форсунки осуществляется с помощью устройства для частотной селекции сигнала.

Выделенный второй информативный источник виброакустического сигнала форсунки (собственные колебания соплового наконечника) в сочетании с акустическим тоном вкрученного потока жидкой серы позволяет полностью идентифицировать условия распыливания жидкого топлива центробежными форсунками.

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ изложены пути решения проблем автоматизации высокотемпературных химических реакторов с использованием виброакустических параметров.

Все разработанные способы управления химическими реакторами реализованы с использованием современной микропроцессорной техники. Типичная схема системы диагностики и управления химическим реактором по виброакустическим параметрам представлена на рис. 8. Система включает в себя пьезоакселерометры ПА, установленные на объекте диагностики, магистральные усилители МУ, устройства виброакустической диагностики УВД, осуществляющие нормирование сигналов, выделение информативных участков спектра, определение диагностических признаков, их сглаживание и преобразование в унифицированный токовый сигнал. Обработка кодов сигналов для их отображения на графиках видеомониторов ВМ и реализация алгоритмов диагностики и управления осуществляется с помощью стандартных и специально разработанных микропроцессорных средств.

Для стабилизации гидродинамического режима циклонных реакторов предложен и реализован в промышленных условиях способ управления, защищенный авторскими свидетельствами СССР N 927320, 1443973, в котором предусматривается косвенный контроль уровня тангенциальной скорости по частоте акустических колебаний выходного вихря и регулирование по этой частоте общей тепловой нагрузки циклона путем изменения расходов топлива и кислорода на всю

группу горелочных устройств. Использование системы управления обеспечивает за счет стабилизации акустического режима улучшение сепарационной способности циклонного реактора (снижение вдвое пыленности газового потока на выходе из котла-утилизатора) и улучшение качества готового продукта.

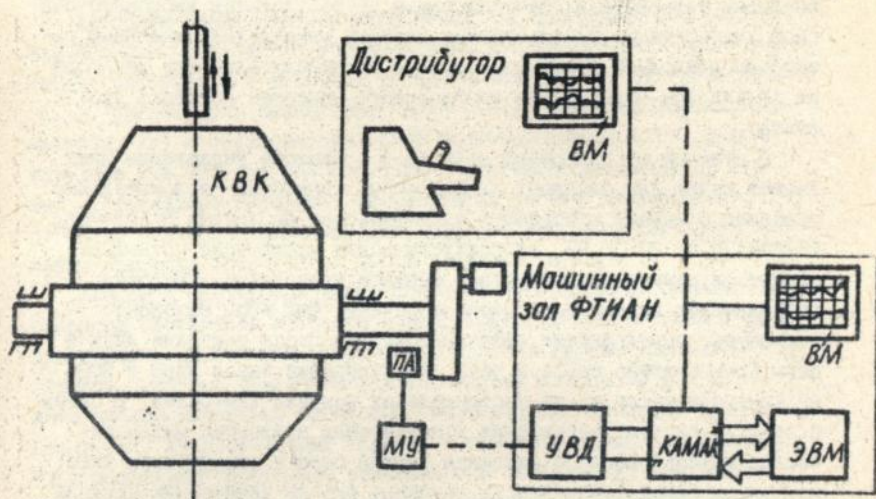


Рис. 8 Система виброакустической диагностики и управления химическим реактором с экстремальными условиями измерений.

Второй способ управления гидродинамическим состоянием циклонного реактора, защищенный авторскими свидетельствами СССР N 1340819 и N 1720729, является эффективным при управлении реакторами, работающими на тугоплавком сырье с сильными настылеобразованиями в районе горелочных устройств. Он заключается в распознавании по параметрам колебаний оболочки циклонного реактора места образования нарушения, искажающего структуру вкрученного потока, и локальных воздействиях на технологический режим. Эти воздействия обеспечивают перераспределение тепловой нагрузки по горелочным устройствам для ликвидации избыточной массы непро-

плавленного материала, регулирование расхода сырья в зависимости от состояния гарнисажной футеровки в зоне сепарации и остановку реактора при получении диагностической информации о наличии утечек из контура охлаждения, которые сопровождаются сильными настылеобразованиями. В системе управления использован информационно-диагностический комплекс на базе микропроцессорного комплекта К580, обеспечивающий классификацию диагностической информации и реализацию нечеткого алгоритма управления тепловой нагрузкой горелочных устройств и расходом сырья по результатам виброакустической диагностики. Использование системы управления циклонным реактором позволяет увеличить среднюю производительность реактора на 10-14% при обеспечении необходимого качества готового продукта.

В отличие от циклонных реакторов в способе управления циклонной печью для сжигания жидкой серы, защищенном положительным решением о выдаче авторского свидетельства по заявке N 4934752/26/039479 от 20.08.92, виброакустическая информация позволяет оценить входные характеристики объекта управления, - условия распыливания жидкой серы через форсунку. При этом выходные параметры, определяющие эффективность процесса сжигания жидкой серы (температура газов в печи, концентрация паров серы и SO₂) не контролируются из-за экстремальных условий измерений. В связи с этим, в системе управления использована эталонная математическая модель процесса сжигания жидкой серы в закрученном потоке, учитывающая совокупность основных физико-химических явлений циклонного процесса. Математическая модель включает в себя математическое описание аэродинамики закрученного потока и движения капель серы, математическое описание процесса распыливания серы форсункой, учитывающее дисперсность капель, математическое описание процесса горения серы и теплообмена.

Входной информацией для управляющей математической модели печи является расход воздуха и результаты виброакустической диагностики условий распыливания серы: расход жидкой серы на форсунку и диаметр ее выходного сопла. С помощью модели при различном состоянии форсунок прогнозируется температура горения серы, температура стенки циклонной печи, концентрация SO₂ на выходе из печи, ее аэродинамическое сопротивление, величина выбросов несгоревшей серы.

При ухудшении условий распыливания серы вследствие изменения гидродинамического состояния форсунок печи стабилизация режима горения, обеспечивающего допустимые выбросы серы, осущест-

ется регулированием площади входных сопел.

При решении задачи автоматизации кислородно-конвертерных процессов производства черновой меди возможность использования детерминированных управляющих воздействий на объект диагностики, как правило, отсутствует. Это обусловлено существенной нестационарностью кислородно-конвертерного процесса, отсутствием контроля за положением фурмы по отношению к расплаву, контроля качества и состава загружаемых холодных оборотов.

Алгоритм диагностики и управления КВК функционирует следующим образом. Устройство виброакустической диагностики конвертера выдает информацию о величине уровня аэродинамического шума фурмы (L_{v1}), уровня шума реакционной зоны (L_{v2}), следа ковариационной матрицы (Tr) и среднеинтегральной частоты сигнала (f_r). Дополнительно для определения состояний "настылеобразования на фурме" и "вскипание расплава" производится расчет производных сигналов dL_{v1}/dt и dL_{v2}/dt ; для определения состояния "расплавление холодных оборотов", - время задержки сигнала.

Алгоритм реализован таким образом, что при существующей скорости протекания процесса конвертирования система может функционировать циклически и проверять одно за другим условия диагнозов. Система диагностики и управления КВК построена на основе набора пороговых элементов, сравнивающих значения сигналов L_{v1} и L_{v2} , их производных dL_{v1}/dt и dL_{v2}/dt , следа Tr , частоты f_r с заданными пороговыми значениями и позволяющих при постановке диагноза выдавать оператору сообщения о состоянии процесса и рекомендуемых управляющих воздействиях, которые обеспечиваются изменением положения фурмы, загрузкой холодных оборотов при вскипании шлака и повышении температуры расплава выше допустимой, покачиванием конвертера, загрузкой скрапа.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Предложена концепция и развито новое научное направление в области диагностики и управления сложными химико-технологическими объектами с экстремальными условиями измерений, включающее использование новых источников информации о состоянии технологического процесса, - шума и вибрации гидродинамического происхождения.

2. Выделен ряд характерных для большинства типов химических реакторов с активной гидродинамической обстановкой информативных источников шума и вибрации, которые являются основой для построения эффективных устройств диагностики и систем управления.

3. Проанализированы физические и теоретические основы процессов генерации информативных источников шума и вибрации химических реакторов. Показано, что использование в процессе диагностики виброакустических параметров обеспечивает достоверное распознавание состояния гидродинамического режима в циклонных реакторах и центробежных форсунках; условий истечения кислородной струи из фурмы конвертера и динамики окислительных процессов в его реакционной зоне.

4. Разработаны математические модели основных источников шума и вибрации для прогнозирования информативного диапазона частот виброакустических сигналов и возможных изменений виброакустических параметров реакторов при появлении различных типов нарушений технологического процесса.

На математических моделях виброакустических сигналов исследованы и обобщены основные закономерности влияния состояния технологических процессов в химических реакторах на параметры виброакустических источников:

- изменение скорости закрученного потока в циклонных реакторах и центробежных форсунках приводит к линейному изменению частоты акустического тона вихревых устройств;
- при насталеобразованиях изменение скорости сверхзвуковой кислородной струи из фурмы конвертера вызывает изменение в соответствии с законом восьмой степени уровня аэродинамического шума струи;
- процесс образования шлака в конвертере в ходе продувки медного штейна при увеличении его массы сопровождается монотонным снижением уровня аэродинамического шума кислородной струи;
- изменение уровня шума реакционной зоны конвертера идентично изменению интенсивности процесса окисления сульфидов металлов;
- образование наростов из непроплавленного материала на стенках циклонного реактора и в зоне ввода топливо-воздушной смеси сопровождается снижением амплитуды собственных колебаний на частотах возбуждающего колебания внутреннего источника;
- изменение диаметра соплового наконечника центробежной форсунки при выгорании или шлаковании приводит к прямо пропорциональному изменению частоты собственных колебаний кромки выходного сопла.

5. Исследованы и обобщены закономерности влияния состояния технологических процессов в химических реакторах на экспериментальные виброакустические характеристики промышленных установок. Нарушения гидродинамического состояния химических реакторов и

условий протекания процессов горения (окисления) сопровождаются адекватными изменениями амплитудных, частотных и обобщенных параметров информативных виброакустических источников.

Экспериментальные исследования виброакустических характеристик химических реакторов являются эффективным средством изучения гидродинамических особенностей промышленных установок:

- измерение частоты акустического тона закрученного потока является эффективным средством оценки основного параметра гидродинамического режима циклонных реакторов, - максимальной вращательной скорости, которая для промышленных установок не может быть с достаточной точностью определена теоретически;

- измерение параметров собственных колебаний сблочки циклонного реактора в зоне ввода топливо-воздушной смеси и максимальной сепарации обеспечивает достоверную информацию о процессах образования гарнисажной футеровки, определяющих тепловой и гидродинамический режимы работы реактора.

6. Разработан комплекс оригинальных устройств для систем диагностики и управления химическими реакторами с экстремальными условиями измерений, обеспечивающий предварительную обработку виброакустических сигналов и выделение диагностических признаков, однозначно связанных с состоянием диагностируемого объекта.

Разработаны аналоговые технические средства для амплитудной и частотной селекции виброакустических сигналов.

Разработаны устройства виброакустической диагностики, защищенные авторскими свидетельствами и обеспечивающие выделение обобщенных диагностических признаков: максимума спектральной плотности виброакустического сигнала, сигнатуры спектра сигнала, следа ковариационной матрицы и среднеинтегральной частоты.

7. Разработаны и защищены авторскими свидетельствами эффективные способы управления циклонными плавильными реакторами, циклонными печами, кислородными конвертерами, использующие виброакустическую информацию о состоянии диагностируемых объектов.

8. Для трех типов химических реакторов с экстремальными условиями измерений осуществлено внедрение эффективных систем виброакустической диагностики и управления, обеспечивающих повышение производительности реакторов, безопасность их эксплуатации, улучшение условий труда и качества готового продукта с реальным экономическим эффектом в размере свыше пяти миллионов рублей (в ценах 1992 г.).

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Болинская Н. П., Ваганов А. И., Тодорцев Ю. К. Исследование возможностей управления аэродинамическим режимом циклонного агрегата. - В кн.: Всесоюзное совещание по мат. модел-ю и управлению высокотемпературными процессами в циклонных и вихревых аппаратах: Тез. докл. - Одесса. - 1980. - С. 160.
2. Ваганов А. И., Тодорцев Ю. К. Исследование процессов генерации звука в аппаратах с активным гидродинамическим режимом для целей управления. - В кн.: II Всесоюзное совещание "Создание и внедрение современных аппаратов с активными гидродинамическими режимами для текстильной промышленности и производства химических волокон": Тез. докл. - М. - 1981. - С. 154.
3. А. с. 922686 СССР. Устройство для автоматического управления аппаратом циклонного типа/ Ю. К. Тодорцев, А. И. Ваганов//Опубл. в Б. И. - 1982. - N 15.
4. А. с. 927320 СССР. Способ автоматического управления аппаратом циклонного типа/Ю. К. Тодорцев, А. И. Ваганов//Опубл. в Б. И. - 1982. - N 18.
5. Тодорцев Ю. К., Ваганов А. И. Исследование акустических характеристик циклонных аппаратов для целей управления. - /Одес. политехн. ин-т. - Одесса, 1983. - 13с. Деп. в ОНИИТЭХИМ, г. Черкассы 4. 11. 1982, N 1186-Д82.
6. Тодорцев Ю. К., Ваганов А. И. О возможности использования явления акустической эмиссии при разработке системы управления циклонными аппаратами. - Одес. политехн. ин-т. - Одесса. - 1982. - 9с. Деп. в УкрНИИТИ 15. 03. 1982. - N 3384.
7. Ваганов А. И., Гайдабуря И. П. Исследование процессов звукообразования в циклонном аппарате при решении задачи управления. - В кн.: XII Всесоюзная НТК "Теория и практика циклонных технологических процессов в металлургии и других отраслях промышленности": Тез. докл. - Днепропетровск. - 1982. - С. 79-80.
8. А. с. 1101685 СССР. Измеритель параметров звуковых колебаний/И. П. Гайдабуря, А. И. Ваганов, А. М. Измайлов//Опубл. в Б. И. - 1984. - N 25.
9. Тодорцев Ю. К., Призанд М. Б., Ваганов А. И. Оценка акустических характеристик циклонного технологического аппарата для производства кормовых обесфторенных фосфатов. - Химическая промышленность. - 1984. - N 7. - С. 55-56.
10. Ваганов А. И., Тодорцев Ю. К. Управление процессом производства обесфторенных фосфатов с использованием акустической

информации. - В кн.: Тезисы докл. на I Всесоюз. научн. конференции "Методы КХП". - М. - 1984. - С. 123-124.

11. Ваганов А. И., Гайдабура И. П. Исследование циклонных технологических аппаратов как вихревых генераторов звука. - В сб.: Тр. НПО "Техэнергохимпром" - Автоматич. управление вихревыми огнетехническими процессами в хим. пр-ти. - М. - 1984. - С. 81-88.

12. Ваганов А. И. Экспериментальное исследование акустических характеристик закрученного потока в вихревом технологическом аппарате для решения задачи управления. - В сб.: Вихревой эффект и его применение в технике. - Куйбышев: КуАИ. - 1984. - С. 250-254.

13. А. с. 1165473 СССР. Способ автоматического управления аэродинамическим режимом циклонного аппарата / И. П. Гайдабура, А. И. Ваганов, Ю. К. Тодорцев и др. // Оpubл. в Б. И. - 1985. - N 25.

14. Ваганов А. И., Пономарева В. А. Идентификация условий функционирования огнетехнических аппаратов с закрученным движением газового потока. - Тезисы докл. на IV Всесоюзной НТК "Математическое моделирование ХТС". - Одесса. - 1985. - С. 148.

15. А. с. 1221500 СССР. Измеритель параметров звуковых колебаний / И. П. Гайдабура, А. И. Ваганов, А. Г. Иванов и др. // Оpubл. в Б. И. - 1986. - N 12.

16. Бочко В. С., Ваганов А. И. Виброакустическая диагностика условий функционирования циклонного реактора. - Тезисы докл. на IV Всесоюз. НТК "Математич. моделирование ХТС". - Одесса. - 1985. - С. 156.

17. Гайдабура И. П., Ваганов А. И., Тодорцев Ю. К. Управление энерготехнологическими вихревыми аппаратами с использованием их акустического поля // Промышленная энергетика. - 1986. - N 7. - С. 36-39.

18. А. с. 1236259 СССР. Способ автоматического регулирования процесса горения в топках с кипящим слоем / Ю. К. Тодорцев, М. Б. Призанд, А. И. Ваганов и др. // Оpubл. в Б. И. - 1986. - N 21.

19. А. с. 1245891 СССР. Измеритель параметров звуковых колебаний / И. П. Гайдабура, А. И. Ваганов, С. А. Худяков // Оpubл. в Б. И. - 1986. - N 27.

20. Ваганов А. И. Идентификация условий сепарации сыпучего материала в объеме циклонного реактора. - Тезисы докл. на Всесоюзной НТК "Технология сыпучих материалов - Химтехника - 86", Белгород. - 1986 - С. 129-130.

21. Ваганов А. И., Бочко В. С. Разработка основных принципов виброакустической диагностики циклонных реакторов. - Деп. в

УкрНИИТИ, N 2687-Ук - 86, 1986. - 12 с.

22. Гайдабура И. П., Ваганов А. И. Акустическая диагностика и управление аэродинамическим режимом энерготехнологических вихревых аппаратов. - Обзорн. инф. - Сер.: Энерготехнологические процессы. - М. - НИИТЭХИМ - 1986. - 40 с.

23. Гайдабура И. П., Ваганов А. И., Худяков С. А. Акустическая диагностика аэродинамического режима огнетехнических аппаратов вихревого типа. - В сб.: Автоматизация химических производств. - М. - 1986. - Вып. 6. - С. 16-19.

24. А. с. 1340819 СССР. Способ автоматического управления циклонно-вихревым аппаратом / А. И. Ваганов, М. В. Призанд, В. М. Юсим и др. // Оpubл. в Б. И., 1987. - N 36.

25. Бочко В. С., Ваганов А. И., Заборовец Н. П. Управление циклонными реакторами по нечеткому алгоритму с использованием виброакустической информации. - Тезисы докл. на Всесоюзн. НТК "Актуальные проблемы моделирования и управления системами с распределенными параметрами. - Киев. - 1987. - С. 177.

26. Бочко В. С., Ваганов А. И., Тодорцев Ю. К. Виброакустическая диагностика и управление химико-технологическими процессами в аппаратах с активной гидродинамической обстановкой. - Тезисы докл. на Всесоюзн. конференции "КХТП-2". - Баку. - 1987. - С. 68.

27. Бочко В. С., Ваганов А. И., Заборовец Н. П., Тодорцев Ю. К. Методика анализа технологических режимов ХТС с использованием виброакустической информации. - Тезисы докл. на V Всесоюзн. научн. конференции "Математическое моделирование сложных ХТС". - Казань. - 1988. - С. 123.

28. Гайдабура И. П., Ваганов А. И., Бочко В. С. Виброакустический контроль и управление циклонными технологическими аппаратами в производстве минудобрений. - Обз. инф. Сер.: "Энерготехнологические процессы", М.: НИИТЭХИМ, 1988. - 37 с.

29. А. с. 1444326 СССР. Способ автоматического управления процессом нейтрализации фосфорной кислоты аммиаком / И. П. Гайдабура А. И. Ваганов, В. С. Бочко и др. // Оpubл. в Б. И., 1988. - N 46.

30. А. с. 1443973 СССР. Способ определения степени обесфторивания кормовых фосфатов в теплотехническом аппарате / И. П. Гайдабура, А. И. Ваганов, В. А. Пономарева // Оpubл. в Б. И., 1988. - N 46.

31. Бочко В. С., Ваганов А. И., Тодорцев Ю. К. Разработка методов диагностики и регулирования гидродинамического состояния сложных химико-технологических объектов. - Тезисы докл. на Всесоюзн. научн. конференции "КХТП-3". - М. - 1989. - С. 99-101.

32. Ваганов А. И., Заборовец Н. П. Нечеткий алгоритм управле-

- циклонно-вихревым реактором. - Тезисы докл. на Всесоюз. науч. конференции "КХТП-3". - М.-1989. - С. 57.
33. Бочко В. С., Бухман М. А., Ваганов А. И. Исследование вибрационных характеристик физической модели вихревого аппарата для решения задач диагностики. - В сб.: Вихревой эффект и его применение в технике: Мат-лы V Всесоюз. научн.-техн. конф. / Куйб. авиац. ин-т. - Куйбышев. -1988. - С. 185-188.
34. А. с. 1483282 СССР. Анализатор для виброакустической диагностики вращающихся деталей // В. Т. Роговский, А. И. Ваганов // Оpubл. в Б. И., 1989. - N 20.
35. А. с. 1503442 СССР. Система для контроля процесса горения / А. И. Ваганов, В. Т. Роговский, В. С. Бочко, Е. К. Олесевич // 1986. - ДСП.
36. Ваганов А. И., Тодорцев Ю. К., Заборовец Н. П. Моделирование процессов в высокотемпературных вихревых аппаратах для оптимизации величины уноса в отходящих газах. - Тезисы докл. на НТК "Проблемы экологии и ресурсосбережения - "Экоресурс-1". - Черкассы, -1991. - С. 27-29.
37. А. с. 1638476 СССР. Устройство для определения среднеинтегральной частоты пульсаций давления / А. И. Ваганов, В. Т. Роговский, С. А. Захаров и др. // Оpubл. в Б. И., 1991. - N 12.
38. Ваганов А. И., Гайдабура И. П., Голубов С. А. Виброакустическая диагностика химико-технологических и теплотехнических объектов. - Общ. инф. - Сер. "Актуальные вопросы химической науки, технологии и охраны окружающей среды." Межотраслевые вопросы. - М.: НИИТЭХИМ, 1990. - Вып. 5 (295). - 48 с.
39. Ваганов А. И., Бочко В. С., Баласанян Г. А., Бошняков Е. А. Диагностика химических реакторов на основе анализа гидродинамических шумов. - Химическая промышленность. -1991. -N 11. - С. 688-690.
40. А. с. 1704828 СССР. Устройство для контроля загрузки шаровой барабанной мельницы / А. И. Ваганов, В. Т. Роговский, В. С. Бочко и др. // Оpubл. в Б. И., 1992. - N 2.
41. А. с. 1720729 СССР. Способ автоматического управления процессом горения в циклонно-вихревом аппарате / А. И. Ваганов, И. П. Гайдабура, В. С. Бочко и др. // Оpubл. в Б. И. - 1992. -N 11.
42. А. с. 1741880 СССР. Способ контроля состояния реактора с неподвижным слоем катализатора / А. И. Ваганов, И. Н. Дорохов, Ю. К. Тодорцев, С. П. Голубов, Г. А. Баласанян // Оpubл. в Б. И. - 1992. - N 23.
43. Заявка на изобретение N 4929519/02/033226. Устройство для контроля кислородно-конвертерного процесса / А. И. Ваганов,

В. Т. Роговский, А. Н. Корнеев. - Решение комитета о выдаче авт. св-ва от 18.03.92.

44. Баласанян Т. А., Ваганов А. И., Тодорцев Ю. К. Система виброакустической диагностики форсунок для камер сгорания на жидком топливе // тез. докл. Республиканской НТК "Математическое моделирование и вычислительный эксперимент для совершенствования энергетических и транспортных турбоустановок в процессе исследования, проектирования, диагностирования и безопасного функционирования. - Харьков, 1991. - С. 111.

45. Заявка № 4934752/26(039479) // Способ автоматического управления горкой для сжигания жидкой серы / А. И. Ваганов, Ю. К. Тодорцев, Т. А. Баласанян, Б. П. Корчагин, А. Д. Яковлев. - Решение комитета о выдаче авт. свидетельства от 09.06.92.

46. Ваганов А. И., Корнеев А. Н., Бошняков Е. А., Жидовецкий Б. Д., Новокременов В. В. Виброакустическая диагностика процесса конвертирования никельсодержащих медных штейнов в вертикальном кислородном конвертере. - Цветные металлы, 1992. - № 10. - с. 11-14.

47. Ваганов А. И. Автоматизация высокотемпературных химических реакторов с использованием виброакустической информации. - Тезисы докл. на I Всеукраинской НМК "ТЭК-Автоматика-93". - Алушта. - 1993 (в печати).

48. Ваганов А. И. Диагностика и управление химическими реакторами с экстремальными условиями измерений. - В сб.: Труды Харьковского политех. ин-та. - Сер.: Техническая кибернетика. - Харьков: ХПИ. - 1993 (в печати).

49. Ваганов А. И. Управление и диагностика технологических аппаратов с интенсивными гидроаэромеханическими потоками на основе виброакустической информации. - В сб.: Труды ученых Одес. политехн. ун-та. - Одесса: ОПУ. - 1993 (в печати).

AB 28.852