

И-85

На правах рукописи

*Исаков*

ИСАКОВ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ  
КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАССОПОДВОДЯЩИХ  
СИСТЕМ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН**

05.21.03 – Технология и оборудование химической переработки  
биомассы дерева; химия древесины

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург 2010



Работа выполнена на кафедре машин и оборудования целлюлозно-бумажных производств Уральского государственного лесотехнического университета

**Научный руководитель:** доктор технических наук,  
профессор Санников  
Александр Александрович

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук,  
профессор Старжинский  
Валентин Николаевич;  
  
кандидат технических наук,  
Чимде Андрей Геннадьевич.

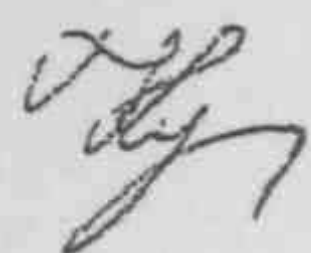
**Ведущая организация:** ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров»

Защита состоится «30» декабря 2010 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.281.02 при ГОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет» по адресу: 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, ауд. 401.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского государственного лесотехнического университета

Автореферат разослан «28» ноября 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат техн. наук, доцент



Н.В. Кузубина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Бумагоделательные и картоноделательные машины (далее БМ) – основные технические системы, завершающие цикл производства бумаги в целлюлозно-бумажном производстве (ЦБП). На качественные показатели бумаги существенное влияние оказывает работа массоподводящей системы (МПС), функциями которой являются: формирование и регулирование композиции и концентрации бумажной массы, её деаэрация, удаление из массы загрязнений, минимизация колебаний давления (пульсаций) в потоке бумажной массы, подача массы стабильной дисперсии массы в напорный ящик и др. Для обеспечения этих функций в МПС используется различное технологическое оборудование: смесительные и массные насосы, напорные сортировки, вихревые очистители (ВО), гасители пульсации и др. Качество бумаги в существенной мере определяется техническим состоянием этого оборудования. Одним из путей совершенствования технической эксплуатации оборудования МПС, повышения качества вырабатываемой продукции и сокращения затрат на поддержание оборудования в работоспособном состоянии является разработка и внедрение методов вибродиагностики оборудования МПС БМ.

**Цель работы** - повышение эффективности работы МПС БМ путем разработки и внедрения методов вибрационного контроля и диагностики технического состояния оборудования МПС, а также методов диагностирования оборудования МПС по качественным показателям бумаги.

**Методы исследования.** Теоретические исследования проведены с привлечением основных положений динамики машин, теории колебаний, методов конечных элементов и контрольных объемов. Использовано лицензионное программное обеспечение. Геометрические построения выполнены в автоматизированной системе трехмерного моделирования. Численные расчеты проведены в пакетах инженерного анализа. Экспериментальные исследования вибрации оборудования МПС и качественных показателей бумаги выполнены на бумагоделательных машинах ОАО «Соликамскбумпром», ОАО «Архангельский ЦБК», ОАО «Пермский картон», ООО «Неманский ЦБК» и Краснокамской бумажной фабрики.

**Предмет исследования.** Вибрационные и гидродинамические процессы в оборудовании МПС.

**Объект исследования.** Оборудование МПС: смесительные и массные насосы, ВО, напорные сортировки.

**Научная новизна работы.** Разработаны методы диагностики технического состояния оборудования МПС БМ по параметрам вибрации и по частотным характеристикам колебаний массы квадратного метра бумаги в продольном направлении. Выявлены параметры гидродинамических процессов в ВО и динамические характеристики поддерживающих конструкций батареи ВО с использованием численного моделирования.

Достоверность научных результатов подтверждается экспериментально и обуславливается использованием при исследованиях развитой те-

научная библиотека

УГЛТУ



рии колебаний, методов конечных элементов и известных программных средств.

**Практическая значимость** Результаты работы могут быть использованы при диагностике технического состояния оборудования МПС при его эксплуатации, а также при проектировании и модернизации. Результаты исследования используются в учебном процессе при подготовке инженеров-механиков и бакалавров по направлению 150400 «Технологические машины и оборудование» в курсах «Контроль и диагностика машин и оборудования», «Теория и конструкция машин и оборудования отраслей». Материалы работы используются в курсовом и дипломном проектировании.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены на научно-технических конференциях студентов и аспирантов Уральского государственного лесотехнического университета в 2004, 2005 и 2006 гг.; на «Международном Евразийском симпозиуме» в рамках I Евро-Азиатского лесопромышленного форума, 2008г. (УГЛТУ, Екатеринбург); Евразийском симпозиуме «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века» 2009г. (УГЛТУ, Екатеринбург); на второй международной научно-практической конференции «Сервисное обслуживание в ЦБП» 2010г. (г. Санкт-Петербург).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, две из которых в изданиях, входящих в перечень ВАК, получено два патента на полезную модель. Работа выполнялась в рамках инициативных хозяйственных работ и госбюджетной темы по единому наряд-заказу Минобрнауки РФ: «Исследование виброакустических процессов при решении трибологических проблем потенциально опасных технических систем отраслей лесного комплекса».

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

методы вибродиагностики конструкций МПС: смесительных и массных насосов, ВО и напорных сортировок, трубопроводов;

диагностика технического состояния оборудования МПС путем спектрально-корреляционного анализа колебаний массы квадратного метра бумаги в продольном направлении;

результаты моделирования и исследования трехмерного течения потока волокнистой суспензии в ВО, объемного напряженно-деформированного состояния и динамических характеристик корпусов ВО и поддерживающих конструкций.

**Объем и структура диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка литературы и приложения. Она включает 145 страниц машинописного текста, 59 иллюстраций, 19 таблиц, 115 наименований использованных источников, в том числе 22 иностранных.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены ее цель и задачи, сформулированы положения выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

### **1. Современное состояние проблемы и постановка задачи работы**

**В разделе** приведены общие сведения об оборудовании МПС, их назначении и принципе действия. Произведен обзорный анализ работ по гидродинамике, вибродиагностике оборудования МПС: смесительных и массных насосов, сортировок с гидродинамическими лопастями, ВО и соединяющих оборудование трубопроводов. Рассмотрены работы по факторам, влияющим на колебания массы квадратного метра бумажного полотна в продольном направлении.

Рассмотрены функции МПС БМ, причины неравномерного отлива бумажной массы и возможность применения диагностики оборудования МПС для повышения надежности оборудования, уменьшения простоев БМ, связанных с внеплановыми остановами элементов МПС, снижения эксплуатационных затрат.

Проведен аналитический обзор работ российских и зарубежных ученых по исследованию динамических и гидродинамических процессов в оборудовании МПС, что позволило выявить актуальность проблемы.

Вопросы, связанные с технологическими аспектами влияния работы МПС на качество бумажного полотна в полной мере исследованы учеными СПбГТУРП (ЛТИ ЦБП) О.А. Терентьевым, В.С. Куровым, И.Д. Кугушевым, Н.Н. Кокушиным, Г.В. Гришиным, А.И. Львовым и другими их коллегами. Гидродинамике МПС и исследованиям пульсаций давления в потоке волокнистой суспензии и методам их уменьшения посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных авторов, защищено большое количество кандидатских и докторских диссертаций. Работы в данном направлении не прекращаются в России и за её пределами.

По исследованию динамики и виброактивности бумагоделательного оборудования опубликовано значительное количество диссертационных работ, отчетов и статей, методических указаний и монографий, некоторые из них принадлежат ученым УГЛТУ: А.М. Витвину, В.М. Болотову, А.И. Партину, В.П. Евдокимову, Е.В. Соколову и др. Ими же рассматривались вопросы виброзащиты и вибродиагностики оборудования ЦБП, включая оборудование МПС. В их исследованиях показано, что пульсация давления бумажной массы является основной причиной колебания массы квадратного метра бумаги в продольном направлении, а также других качественных показателей бумаги, что снижает качество бумаги и увеличивает обрывность бумажного полотна.

Основными источниками колебаний давления (пульсации давления) бумажной массы являются смесительные и массные насосы центробежного типа, напорные сортировки с гидродинамическими лопастями. Пульсации давления центробежных насосов обусловлены, в основном, конечным числом лопастей на крылатке насоса. Повышенная пульсация бумажной массы обуславливается также неудовлетворительным техническим состоянием оборудования МПС, некачественным ремонтом, монтажом. В разделе рас-



смотрены и другие причины повышения интенсивности пульсации, а также мероприятия по её уменьшению.

В заключении сделан вывод, что исследования источников пульсаций давления бумажной массы, их влияния на качественные показатели бумаги выполнялись в многочисленных работах. Однако в этих работах не ставилась задача выявления (диагностирования) структурных и функциональных параметров технического состояния оборудования МПС по параметрам их вибрации и качественным показателям бумаги.

## 2. Виброакустические процессы в массоподводящих системах бумаго- и картоноделательных машин

Математические модели механических систем в линейной постановке обычно представляются следующими математическими зависимостями:

при детерминированном динамическом воздействии

$$X(\omega) = H(\omega)F(\omega) < [X(\omega)], \quad (1)$$

при случайном динамическом воздействии

$$S_x(\omega) = [H(\omega)]^2 S_F(\omega) \leq [S_x(\omega)], \quad (2)$$

где  $X(\omega)$  - спектр параметров вибрации;  $H(\omega)$  - передаточная функция;  $F(\omega)$  - спектр сил возмущающих колебания;  $S_x(\omega)$  - плотность вероятности энергии вибрации;  $S_F(\omega)$  - плотность вероятности возмущающих колебания сил;  $[X(\omega)]$  и  $[S_x(\omega)]$  - предельные (нормативные) параметры вибрации.

Из этих зависимостей вытекает, что при исследовании виброакустических процессов в механических системах, в том числе в оборудовании МПС, необходимо выявлять характер динамического воздействия  $F(\omega)$  или  $S_F(\omega)$ , передаточные функции  $H(\omega)$  и предельные значения параметров соответственно  $[X(\omega)]$  и  $[S_x(\omega)]$ .

В разделе определяются динамические воздействия в оборудовании МПС. По виду и источнику возникновения динамические воздействия делятся на следующие группы:

силовые технологические воздействия рабочих органов машин и оборудования, например, в узлоловителях и насосах лопасти создают динамические воздействия в областях высокого и низкого давления;

динамические нагрузки от движения обрабатываемого материала, например, от движения волокнистой суспензии в трубопроводах МПС;

центробежные силы инерции неуравновешенных масс роторов машин и вращающейся с ротором волокнистой суспензии;

импульсные, кинематические и силовые воздействия, возникающие при несовершенстве, износе и повреждениях элементов кинематических пар, при дефектах монтажа и сборки, например, при несоосности валов электродвигателей и насосов, роторов и шкивов узлоловителей, переменные зазоры между гидродинамическими лопастями узлоловителя и ситом и т.д.;

параметрические воздействия из-за изменения параметров динамической системы, чаще всего, коэффициентов жесткости оборудования и опорных конструкций МПС;

гидравлические удары и пульсации давления, турбулентные и кавитационные явления в насосно-трубопроводных системах.

Центробежные силы инерции неуравновешенных масс роторов являются одной из основных причин вынужденных колебаний оборудования. Различают по взаимному расположению осей инерции и вращения статическую, моментную и динамическую неуравновешенности.

Гидравлическая неуравновешенность проявляется на частотах, меньших частоты вращения ротора насоса или узлоловителя вследствие отставания вращения жидкости от вращения ротора. В напорных сортировках неуравновешенность вращающейся массы возникает также из-за нецилиндричности внутренней поверхности корпуса и сита и несоосности вала, сита и корпуса сортировки.

Пульсации давления на лопастных частотах и их гармониках возникают в результате дискретного воздействия каждого возмущающего элемента сортировок и насосов на поток суспензии и являются технологической функцией процессов в МПС. Пульсация давления возрастает при ухудшении технического состояния или при работе гидравлического агрегата не в оптимальном режиме, соответствующем максимальному КПД.

Специфическими для насосов источниками вибрации являются: отраженная волна и помпаж, срыв потока, срыв вращения, пульсация давления в потоке, кавитация, турбулентный характер течения жидкости и др.

В разделе рассматриваются также случайные динамические и гидродинамические воздействия в МПС БМ в ВО. Совокупность таких воздействий рассматривается как случайная величина в виде «белого шума», ограниченного определенным частотным диапазоном. Спектральная плотность вероятности распределения мощности силового воздействия  $S_F(\omega)$  выражается зависимостью (3).

$$\text{при } 0 < \omega < \omega_c, \quad S_F(\omega) = \frac{\sigma_F^2(t)}{2\omega_c}; \quad \text{при } \omega > \omega_c, \quad S_F(\omega) = 0, \quad (3)$$

где  $\omega_c$  - предельная частота, ограничивающая белый шум;  $\sigma_F(t)$  - среднеквадратическое отклонение динамических воздействий.

Разработана динамическая модель короткой линии МПС бумагоделательных машин. Выявлены детерминированные и случайные динамические воздействия механического и гидродинамического характера на оборудование МПС. Показана взаимосвязь и взаимозависимости пульсации давления в потоке волокнистой суспензии и вибрации оборудования. Выявлены основные закономерности возникновения и распространения пульсаций давления в трубопроводной системе, определены источники вибрации трубопроводов.



### 3. Численное моделирование динамики и гидродинамических процессов в вихревых очистителях

Моделирование гидродинамических процессов в ВО проведено для определения параметров трехмерного потока жидкости в ВО и для разработки методики расчета динамического состояния батареи ВО.

Волокнистая суспензия представляет модель сплошной среды во внутреннем объеме ВО. Математическая модель течения жидкости в технологических гидравлических аппаратах реализуется численными методами. Цель численного моделирования заключается в установлении закономерностей движения жидкости в гидравлическом агрегате при наложении внешних граничных условий. В программе численного моделирования предварительно наносится на трехмерную модель внутреннего объема ВО конечно-объемная сетка. Кинематические и динамические параметры жидкости описываются общим уравнением динамики вязкой жидкости (уравнение Навье-Стокса) и уравнением неразрывности. За объект моделирования принята батарея ВО типа «Форжект 410».

В ВО подается бумажная масса низкой концентрации. Поэтому допустимо при моделировании гидродинамических процессов в ВО использовать модель сплошной среды с реологическими свойствами чистой воды. По данным исследований В.И. Климова, реологические характеристики волокнистой суспензии с низкой концентрацией волокна до 2% и чистой воды отличаются мало.

При расчете задавались следующие граничные условия: полное давление на входе в массы в ВО  $p = 321 \text{ кПа}$ , на выходах очищенной бумажной массы и отходов соответственно  $p_{\text{бм}} = 50 \text{ кПа}$  и  $p_{\text{отх}} = 25 \text{ кПа}$ . В результате расчета получены объемные картины распределения давлений и скоростей жидкости в ВО, представленные на рис.1.

Расчеты показали неравномерное распределение скоростей и давлений в продольном и поперечном сечениях ВО, из чего можно сделать вывод, что при работе ВО в нем возникает гидравлическая неуравновешенность.

Для решения задач динамики батареи ВО использован метод конечных эле-

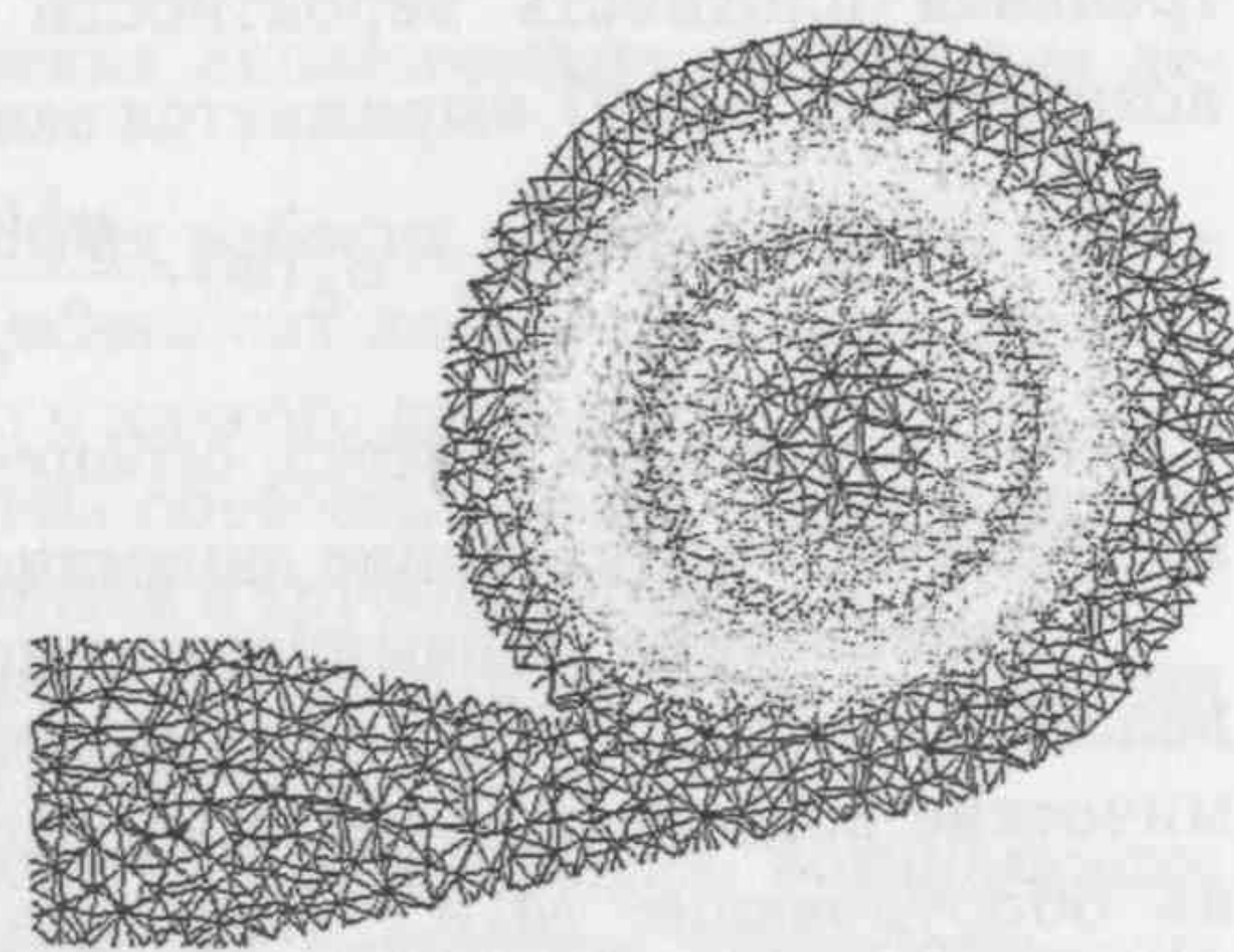
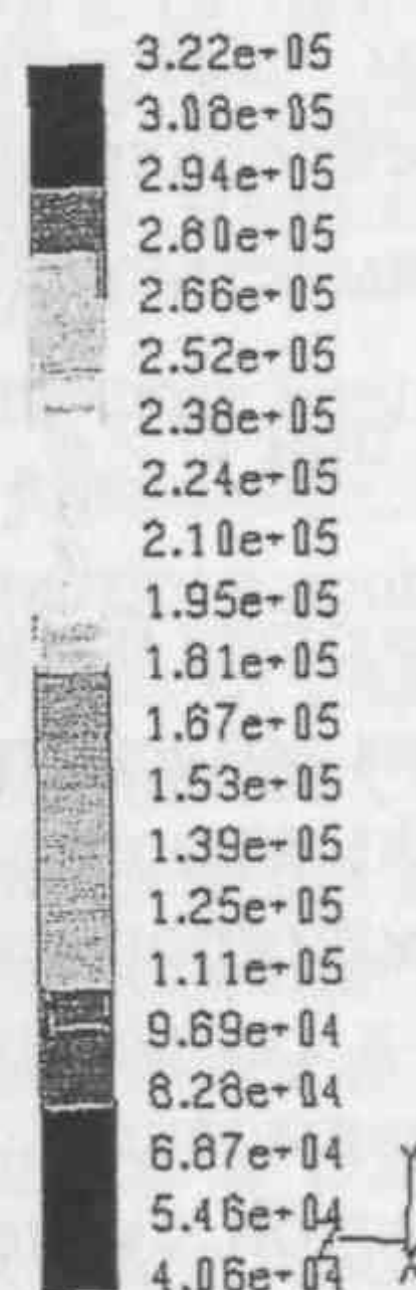


Рис. 1. Поле распределения полного давления в ВО

ментов (МКЭ). Колебания конструкции описываются уравнением Лагранжа второго рода

$$[M]\{\ddot{q}\} + [B]\{\dot{q}\} + [C]\{q\} = \{F(t)\}, \quad (4)$$

где  $[M]$  – матрица масс системы;  $[B]$  – матрица демпфирования системы;  $[C]$  – матрица жесткости;  $\{q\}, \{\dot{q}\}, \{\ddot{q}\}$  – обобщенные перемещения узлов и их производные;  $\{F(t)\}$  – обобщенные силы.

Свободные колебания пространственных конструкций без затухания описываются следующей системой дифференциальных уравнений

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{q\} = 0. \quad (5)$$

Работа по созданию и расчету модели включает построение модели, приложение нагрузок, граничных условий, получение и анализ результатов.

Результатом моделирования является определения форм и частот свободных и вынужденных колебаний конструкции. Конечно-элементная модель блока ВО состоит из 25 объемов. В модели назначается три материала (рис. 2): материал корпуса ВО – сталь X18H10T; материал резиновых патрубков – резина; материал опорной конструкции – Ст3.

Для учета массы жидкости в модели принято искусственно увеличенная плотность материала ВО. Конечно-элементная модель состоит из 87 тысяч элементов. В решаемой задаче не учитываются внешние силы, действующие на батарею ВО. Результаты расчета частоты и формы свободных колебаний конструкции блока ВО представлены в табл. 1 и на рис. 3.

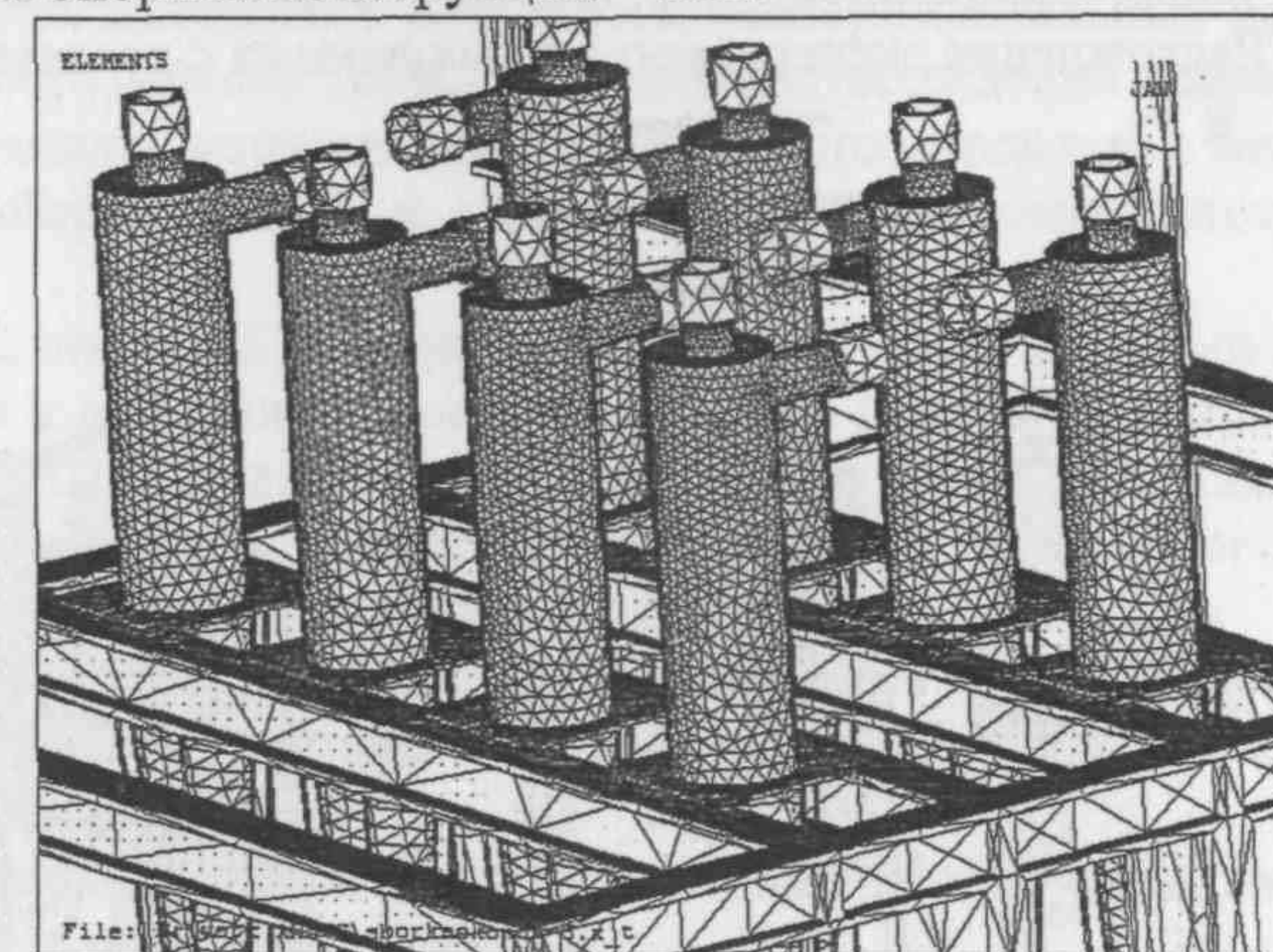


Рис. 2. Фрагмент конечно-элементной модели блока вихревых очистителей

Таблица 1

Свободные колебания конструкции блока ВО

Низшие частоты свободных колебаний, Гц		
1-ая форма	2-ая форма	3-я форма
28,4	36,4	39,1



Для определения отклика модели от случайного воздействия используется гармонический анализ, который представлен в виде передаточной функции. Воздействия для гармонического анализа представлены в виде сосредоточенной нагрузки, равной единичной силе ( $F_u = 1H$ ), приложенной к узлу конечного элемента в центре опорной конструкции блока ВО в направлении наименьшей жесткости. Передаточная функция представлена рис. 4,а. Анализ передаточной функции показал, что возбуждение от единичной силы в направлении ОХ дает отклики модели во всех трех направлениях, которые содержат ярко выраженные пики амплитуд собственных частот колебаний батареи ВО.

Расчеты выявили собственные частоты колебаний: 28,4, 36,4 и 39,1 Гц. Максимальная энергия колебаний проявляется на второй собственной частоте колебаний (36,4 Гц) при горизонтальных колебаниях конструкции. Подтверждается наличие расчетных частот колебаний конструкции в полученном экспериментально в спектре виброскорости батареи ВО, эксплуатируемой в МПС БМ №3 Краснокамской бумажной фабрики. Максимальное значение виброскорости на частоте вибрации – 38,5 Гц, показано на рис. 4,б. Расхождение экспериментальных данных с расчетными равно 5,5 %.

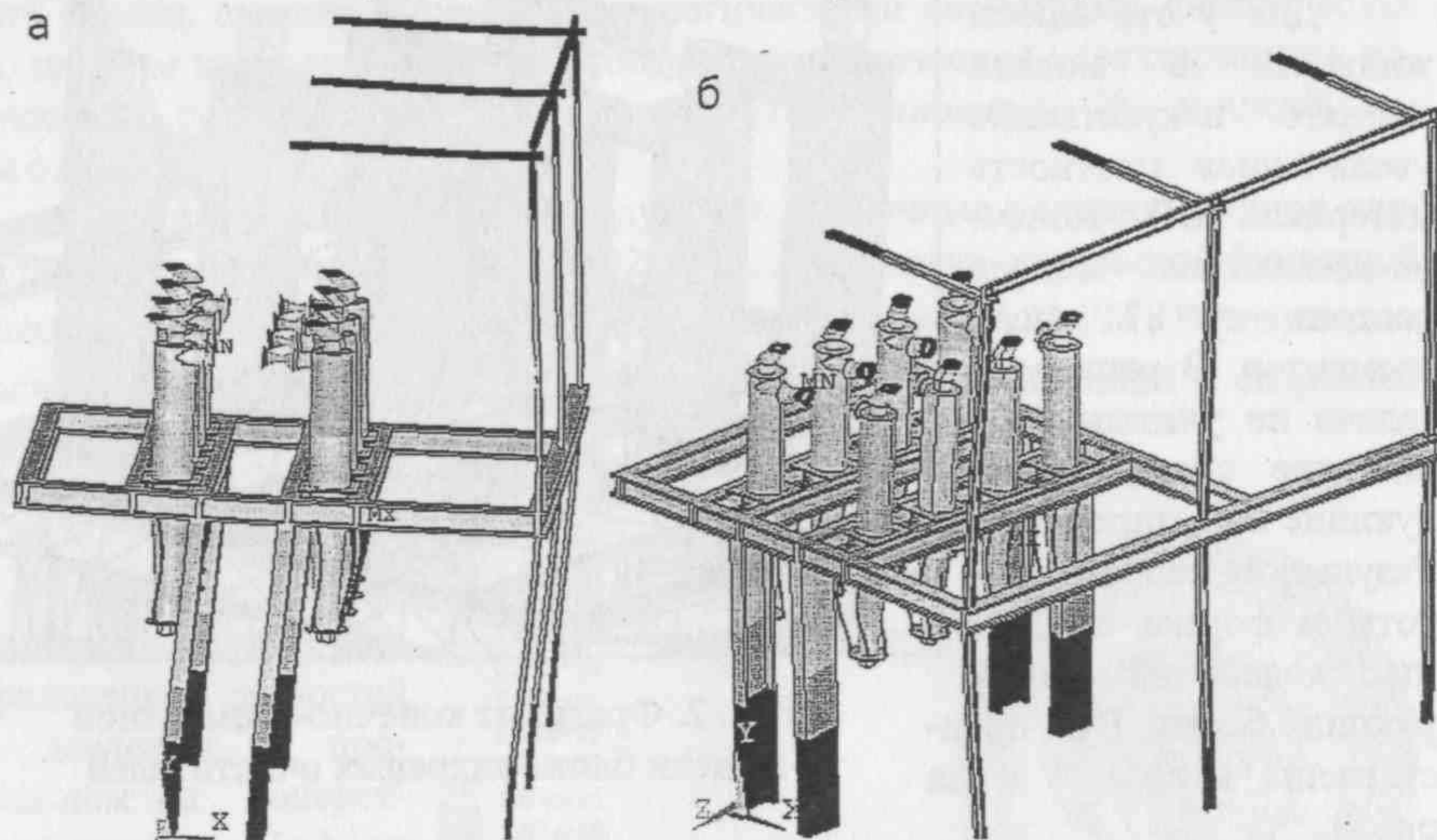


Рис. 3. Формы колебаний конструкции: а и б – первая и вторая формы колебаний

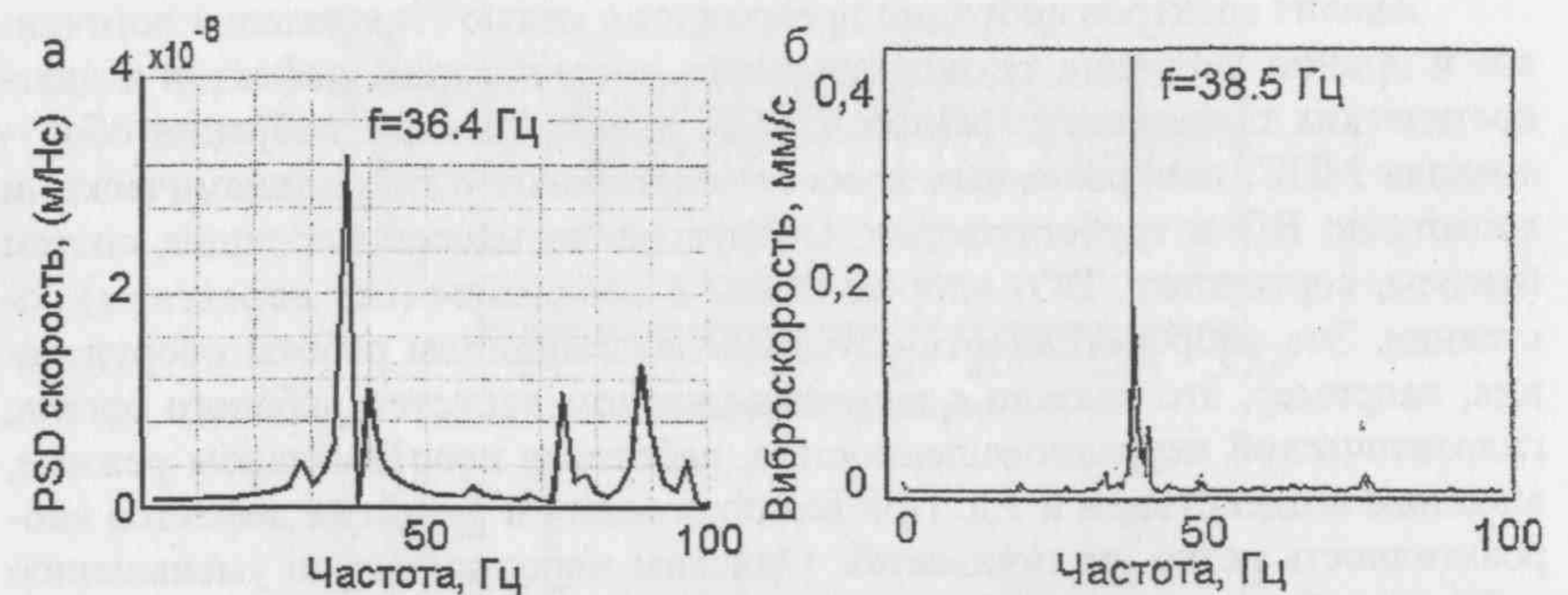


Рис. 4. а - передаточная функция при единичном гармоническом воздействии; б - спектр горизонтальной вибрации батареи вихревых очистителей

#### 4. Экспериментальные исследования вибрации и диагностика оборудования массоподводящих систем

В разделе приводится методика и результаты экспериментальных исследований вибрации оборудования МПС с целью подтверждения основных теоретических положений, изложенных в предыдущих разделах, а также для обоснования выбора методов и средств вибродиагностики этого оборудования.

Функции МПС различных БМ идентичны, но структура их (компоновка, тип оборудования и др.) существенно отличаются. Поэтому экспериментально обследованы МПС нескольких машин с различными режимами работы (обороты роторов, напор, производительность и т.д.) с учетом особенностей конструкции (тип ротора, кол-во лопастей и т.д.).

Для измерения и обработки вибрации использовались виброанализатор СД12М и программное обеспечение «Vibro 12» Санкт-Петербургской фирмы ООО «Ассоциация ВАСТ».

Экспериментальное определение параметров вибрации оборудования МПС выполнялось для решения следующих задач:

выявление основных закономерностей вибрации;

определение параметров технического состояния оборудования МПС

БМ;

диагностическое нормирование вибрации.

Для выявления основных закономерностей вибрации оборудования МПС производился спектральный анализ вибрации. Измерение вибрации проведено в соответствии с требованиями ГОСТ 26493-85, пьезоакселерометры крепились в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5348-99, точки для измерения вибрации выбирались в соответствии с рекомендациями ГОСТ ИСО 10816-1-97.



Анализ спектров вибрации проводился с целью определения источников и причин вибрации технологического оборудования, дефектов и диагностических признаков дефектов. Представлены спектры вибрации оборудования МПС: центробежных насосов; сортировок с гидродинамическими лопастями; ВО и трубопроводов. Оборудование массоподводящих систем (насосы, сортировки, ВО) виброактивны в идеальном (без дефектном) состоянии. Эта виброактивность обусловлена принципом работы оборудования, например, это связано с конечным числом лопастей рабочего органа, гидравлической неуравновешенностью, работой в неоптимальном режиме, внешним воздействием и т.д. При возникновении и развитии дефектов виброактивность резко увеличивается. Описаны мероприятия по уменьшению вибрации оборудования МПС и рекомендации при проектировании или ремонте, которые позволят снизить их виброактивность. Некоторые из них для насосов и напорных сортировок: увеличение числа лопастей и уменьшение частоты вращения ротора, применение спиральных лопастей; уменьшение гидравлической неуравновешенности и неуравновешенности масс ротора; уменьшение количества поворотов трубопроводов, увеличение их радиусов поворотов и др.

#### 5. Диагностика оборудования массоподводящих систем по колебаниям массы квадратного метра бумаги в продольном направлении

Представлена методика диагностирования оборудования МПС. Диагностирование технического состояния и степень воздействия технологического оборудования на технологический процесс производства бумаги оценивались по спектральному составу колебаний массы квадратного метра бумажного полотна. Для проведения исследований брались образцы бумаги с БМ, на которых производились измерения вибрации. Исследования проводились на разных видах бумаги и картона массой от 45 до 167 г/кв.м. В зависимости от минимальной частоты возмущений предполагаемых источников длина и количество взвешиваемых образцов бумаги в разных опытах варьировалась от 20 до 200 мм и от 60 до 305 шт соответственно. По спектральной плотности колебания массы квадратного метра бумажного полотна определялись источники возмущений. На рис. 5а представлена профилограмма колебаний массы квадратного метра бумаги, вырабатываемой на БМ №3 Краснокамской бумажной фабрики. Длина образца 20 мм, количество образцов 300 шт. Плотность вероятности отклонения массы приведена на рис. 5б.

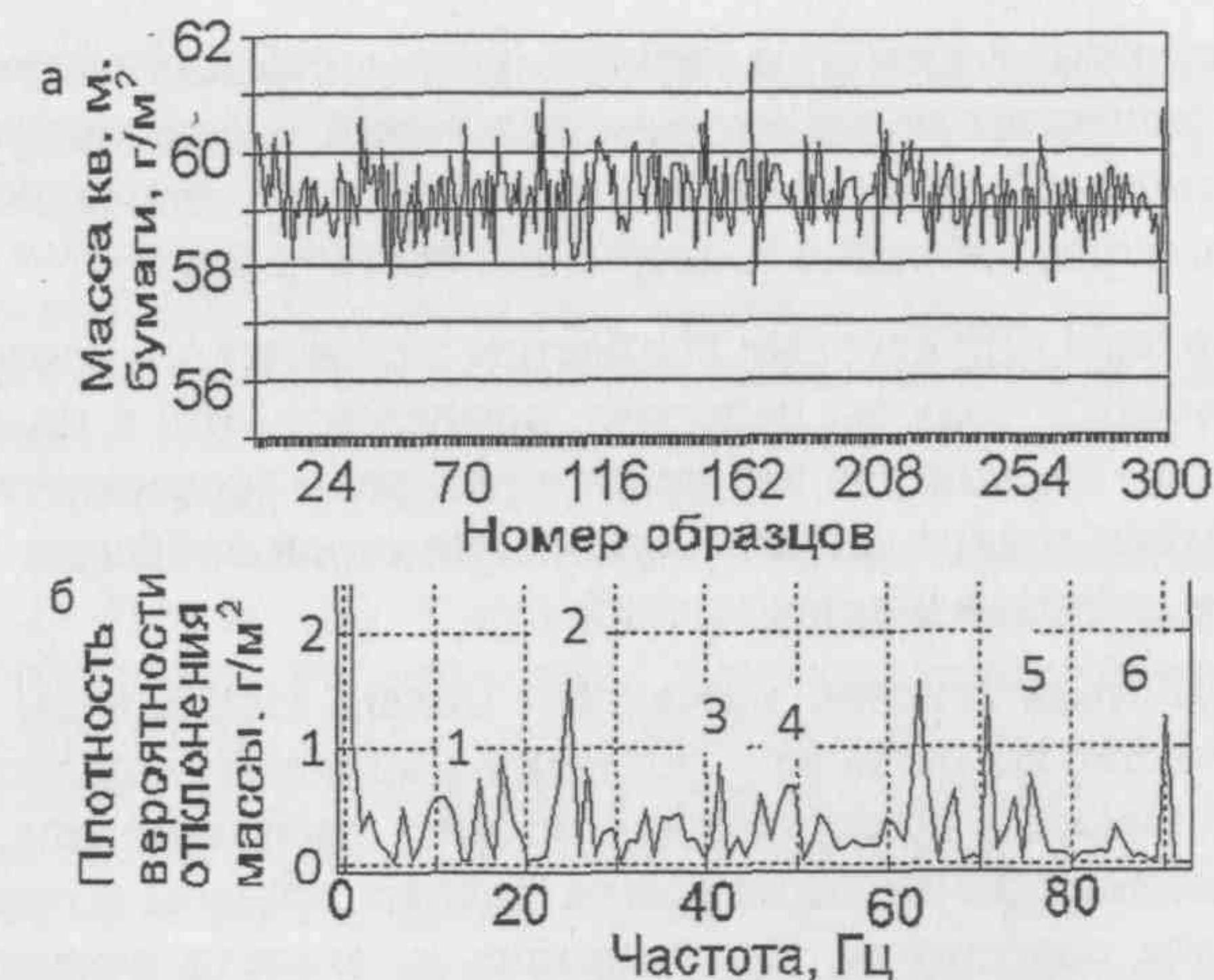


Рис. 5. Анализ колебания массы квадратного метра бумаги в продольном направлении: а – профилограмма массы квадратного метра бумаги; б – плотность вероятности отклонения массы.

На спектре проявляются гармоники оборотной и лопастной частот (т. 1), оборотной (т. 2) и второй гармоники оборотной частоты (т. 4) смесительных насосов, частоты вибрации блока ВО (т. 3), частоты колебаний конструкции напорного ящика (т. 6).

В результате при анализе колебания массы квадратного метра бумажного полотна выявлены причины и источники его неоднородности в продольном направлении. Определено, что на качественные показатели бумажного полотна влияет все оборудование МПС. Это влияние связано с его техническим состоянием.

#### ВЫВОДЫ

1. Техническое состояние оборудования массоподводящих систем бумагоделательных и картоноделательных машин характеризуется работоспособностью этого оборудования и оказывает существенное влияние на качественные показатели вырабатываемой бумаги. Поэтому разработка методов диагностики оборудования массоподводящих систем, направленная на совершенствование технической эксплуатации оборудования и повышение качества выпускаемой бумаги, актуальна.

2. Предложены два взаимодополняющих метода диагностики: вибрационный и по колебаниям массы квадратного метра бумаги в продольном направлении. Связь колебаний параметров бумаги с пульсацией давления в потоке волокнистой суспензии общеизвестна. Показано, что подобная связь существует также между параметрами вибрации оборудования и параметрами качественных показателей бумаги. По вибрационным параметрам вы-



явлены структурные параметры технического состояния оборудования (дефекты), а по допустимым параметрам колебаний массы квадратного метра бумажного полотна уточнены предельные значения диагностических признаков – параметров вибрации конструкций оборудования.

3. Выявлены структурные параметры технического состояния смесительных и массных насосов, напорных сортировок, ВО и их диагностических признаков – параметров вибрации; приведены математические диагностические модели в виде зависимостей параметров вибрации конструкций от параметров дефектов и повреждений.

4. Разработана конечно-элементная модель гидродинамических процессов при очистке волокнистой суспензии в вихревых очистителях, позволяющая качественно и количественно оценить распределение скоростей и давлений волокнистой суспензии при различных объемах и геометрических формах корпуса очистителя. Исследования на модели показали, что вращающаяся в вихревом очистителе жидкость имеет гидравлическую неуравновешенность, проявляющуюся в виде центробежных сил инерции, действующих на корпус очистителя в широком диапазоне частот. Динамические воздействия носят случайный характер и представлены в виде «белого шума» с ограниченным частотным диапазоном. Эти воздействия возбуждают вибрацию корпуса очистителя и поддерживающих конструкций на их собственных частотах. Колебания на этих же частотах проявляются на спектрах колебаний массы квадратного метра бумаги.

5. Показана необходимость при проектировании и модернизации массоподводящих систем выполнение динамического расчета поддерживающих конструкций блоков вихревых очистителей. Предложен конечно-элементный метод расчета этих конструкций.

6. Рекомендовано для диагностирования технического состояния и нормирования предельных параметров вибрации оборудования массоподводящих систем использовать корреляционно-спектральный анализ бумажного полотна.

#### Основное содержание диссертации изложено в публикациях:

1. Исаков С.Н. Пульсация суспензии в массоподводящей системе бумагоделательной машины [Текст] / С.Н. Исаков // Материалы научно-технической конференции студентов и аспирантов Уральского государственного лесотехнического университета / Урал. гос. лесотехн. ун-т.– Екатеринбург, 2004. – С.170-170.

2. Исаков С.Н.. Колебания трубопроводов массоподводящей системы бумагоделательной машины [Текст] / С.Н. Исаков // Материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов / Урал. гос. лесотехн. ун-т.– Екатеринбург, 2005. – С.142.

3. Исаков С.Н. Диагностика технического состояния насосно-трубопроводных систем по параметрам вибрации корпуса насоса и трубопроводов [Текст] / С.Н. Исаков // Материалы уральской горнопромышленной декады 4-14 апреля 2005г. / Урал. гос. горно-геолог. акад. - Екатеринбург, 2005. - С.169.

4. Исаков С.Н. Идентификация колебаний массы кв. м. бумаги [Текст] / С.Н. Исаков // Материалы II всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов 17-26 апреля 2006г. / Матер. науч.-техн. конф. Ч.1 - Урал. гос. лесотехн. ун-т.– Екатеринбург, 2006. – С.171-173.

5. Исаков С.Н. Методика измерения и анализа колебаний массы кв. м. бумаги [Текст] / С.Н. Исаков, Н.В. Кузубина // Межвузовский сборник научных трудов Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров / СПбГТУРП – Санкт-Петербург, 2007 – С. 14-17.

6. Исаков С.Н. Диагностика технического состояния оборудования массоподводящих систем бумагоделательных машин [Текст] / С.Н. Исаков, Н.В. Кузубина // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2008. - №5. – С. 58-59.

7. Исаков С.Н. Диагностическая паспортизация технологического оборудования [Текст] / А.А. Дунаев, С.Н. Исаков, Н.В. Кузубина // «Международный Евразийский симпозиум 30 сентября – 3 октября 2008» в рамках I Евро-Азиатского лесопромышленного форума / Урал. гос. лесотехн. ун-т.– Екатеринбург, 2008. – С.185-189.

8. Исаков С.Н. Моделирование динамических процессов в конструкциях массоподводящих систем бумагоделательных машин [Текст] / Санников А.А., С.Н. Исаков, И.С. Ложкин // Сборник научных трудов «Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии» Вып. 189 / Санкт-Петербург, 2009 – С. 149 – 156.

9. Исаков С.Н. Идентификация и выявление источников колебаний массы 1 м<sup>2</sup> картона на картоноделательной машине Б-21 [Текст] / С.Н. Исаков, М.М. Мударисов, А.В. Лихачев // Материалы V Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» Ч. 1 / Урал. гос. лесотехн. ун-т.– Екатеринбург, 2009. – С.259-261.

10. Исаков С.Н. Основные динамические воздействия на конструктивные элементы массоподводящих систем [Текст] / С.Н. Исаков // Материалы V Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» Ч. 1 / Урал. гос. лесотехн. ун-т.– Екатеринбург, 2009. – С.207-209.

11. Исаков С.Н. Вибрация и конечно-элементный анализ работы вихревых очистителей [Текст] / С.Н. Исаков // Вибродиагностика, триботехника, вибрация и шум. Монографический сборник материалов семинара VII Международной научно-технической конференции «Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» // Урал. гос. лесотехн. ун-т.– Екатеринбург, 2009. – С.161-165.

12. Исаков С.Н. Вибрация оборудования массоподводящих систем [Текст] / С.Н. Исаков // Вибродиагностика, триботехника, вибрация и шум. Монографический сборник материалов семинара VII Международной научно-технической конференции «Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» // Урал. гос. лесотехн. ун-т.– Екатеринбург, 2009. – С.280-284.



13. Исаков С.Н. Методика оценки и прогнозирования вибрационного состояния строительных конструкций зданий бумагоделательных цехов [Текст] / С.Н. Исаков // Вибродиагностика, триботехника, вибрация и шум. Монографический сборник материалов семинара VII Международной научно-технической конференции «Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» // Урал. гос. лесотехн. ун-т. – Екатеринбург, 2009. – С.250-253.

14. Исаков С.Н. Обоснование применения численных методов расчета при проектировании вихревых очистителей [Текст] / С.Н. Исаков // Деревообработка // Урал. гос. лесотехн. ун-т. – Екатеринбург, 2009. – С.119-122.

15. Исаков С.Н. Моделирование течения жидкости в запорной арматуре трубопроводных систем [Текст] / С.Н. Исаков, Мударисов М.М. // Непрерывное образование: инженерное творчество молодежи: сб. научных трудов/ Под ред. А.А. Санникова, Н.В. Куцубиной. – Екатеринбург: Уральск. гос. лесотехн. ун-т, 2010. – С.63-64.

16. Исаков С.Н. Влияние гидродинамических процессов в узлах напорного ящика на качественные показатели бумаги [Текст] / С.Н. Исаков, И.Р. Халлиулин // Непрерывное образование: инженерное творчество молодежи: сб. научных трудов / Под ред. А.А. Санникова, Н.В. Куцубиной. – Екатеринбург: Уральск. гос. лесотехн. ун-т, 2010. – С.65-66.

17. Исаков С.Н. Вихревая очистка бумажной массы [Текст] / С.Н. Исаков, Ложкин И. С. // Вибродиагностика, триботехника, вибрация и шум: монографический сборник/ Под ред. А.А. Санникова, Н.В. Куцубиной. – Екатеринбург: Уральск. гос. лесотехн. ун-т, 2010. – С.61-62.

18. Исаков С.Н. Диагностика конструктивных элементов массоподводящих систем [Текст] / С.Н. Исаков, Куцубина Н.В. // Сервисное обслуживание в ЦБП: сборник трудов 2-й международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 1-2 июля 2010 года / Под ред. проф. А.Н. Иванова; ГОУВПО СПбГТУРП.- СПб., 2010. – С.70-71.

19. Пат. 47379 РФ, МПК D 21 F 7/00. Гаситель пульсации давления / Санников А.А., Исаков С.Н. – 2005106064/22; Заявлено 03.03.2005; Оpubл. 27.08.2005. Бюл. №24

20. Пат. 86260 РФ, МПК F16F 13/26, D21F 1/00. Гаситель пульсации давления / Исаков С.Н., Куцубина Н.В., Стюнин Д.И. – 2009115338/22; Заявлено 22.04.2009; Оpubл. 27.08.2009. Бюл. №24

*A - 1614*

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37. УГЛТУ, ученому секретарю диссертационного совета.

Подп. в печать 20.11.2010 г. Объем 1 п.л. Заказ № 482 Тираж 100

Уральский государственный лесотехнический университет  
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37.

Отдел оперативной полиграфии