

На правах рукописи



Максачук Александр Иванович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ  
РАЗМЕРОВ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ПО ИХ  
СОБСТВЕННЫМ ЧАСТОТАМ МЕХАНИЧЕСКИХ  
КОЛЕБАНИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля  
природной среды, веществ, материалов и изделий

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

Бийск – 2009

Работа выполнена в Бийском технологическом институте (филиале)  
государственного общеобразовательного учреждения высшего  
профессионального образования «Алтайский государственный  
технический университет им. И.И. Ползунова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Леонов Геннадий Валентинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Седалищев Виктор Николаевич

кандидат технических наук  
Митин Александр Германович

Ведущая организация: Институт проблем химико-энергети-  
ческих технологий Сибирского отде-  
ления Российской академии наук  
(г. Бийск, Алтайский край)

Защита состоится «2» июня 2009 года в 10 час. 00 мин. на заседании  
диссертационного совета Д 212.004.06, действующего при Алтайском  
государственном техническом университете им. И.И. Ползунова, по адресу:  
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, в ауд. 127 гл. к.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке  
Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползуно-  
ва.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные  
гербовой печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря  
диссертационного совета, по указанному адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ле-  
нина, 46. E-mail: [krivobok@ab.ru](mailto:krivobok@ab.ru).

Автореферат разослан «30» апреля 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Кривобоков Д.Е.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В химической, энергетической, пищевой и ряде других отраслей промышленности геометрические параметры дисперсных систем являются важнейшими исходными, промежуточными и во многих случаях конечными параметрами качества объектов переработки.

Реализация эффективного управления качеством на стадии его формирования в технологическом теплообменном аппарате возможна только при получении измерительной информации о поверхности контакта фаз в требуемом объеме. Однако зачастую отсутствие достаточно точных средств оперативного контроля, невозможность работы существующих приборов и систем дисперсионного анализа многофазных полидисперсных систем в потоке среды или непосредственно в объемах аппаратов не позволяет осуществлять эффективное управление. Особенно остро проблема ощущается при определении поверхности контакта фаз агрессивных сред и в области потенциально опасных технологий. В данном случае разработка методов автоматизированного дистанционного контроля и диагностики дисперсных сред, позволяющих определять как дифференциальные, так и интегральные характеристики распределения частиц по размерам, особенно актуальна.

Использование метода дистанционного определения размеров дисперсных частиц непосредственно в теплообменных аппаратах в ходе технологического процесса производства серной кислоты позволит снизить затраты на сырье, уменьшить количество потерь конечной продукции и обеспечить равномерную нагрузку оборудования.

### **Цель исследования:**

Разработка метода и средства контроля размеров дисперсных частиц в технологическом процессе получения серной кислоты.

### **Задачи исследования:**

1. Аналитический обзор научно-технической литературы по системам контроля размеров дисперсных частиц.
2. Проведение информационного исследования по методам и средствам измерений, анализ основных этапов создания измерительно-вычислительных комплексов сбора, обработки аналоговой и цифровой информации.
3. Решение задачи взаимодействия зондирующего излучения с колеблющимися дисперсными частицами.
4. Разработка методов контроля размеров дисперсных частиц для использования как в лабораторных условиях, так и непосредственно для контроля в объемах теплообменных аппаратов в ходе технологического процесса.
5. Разработка комплекса программно-технических средств экспериментальной установки автоматического дистанционного контроля размеров дисперсных частиц.

**Объектом исследования** являются метод и устройство для определения геометрических параметров элементов дисперсной фазы систем газ–жидкость и жидкость–жидкость.

#### **Методы исследования**

В диссертационной работе использованы оптические методы, методы цифровой обработки информации, методы физико-механических испытаний, методы математической статистики и обработки экспериментальных данных.

В качестве методов исследования используются аналитический и экспериментальный. Аналитический метод исследований применяется для разработки математического описания взаимодействия ультразвуковых колебаний с дисперсной частицей.

#### **Научная новизна:**

1. Теоретически и практически показана возможность контроля размеров жидких и газообразных дисперсных частиц по модуляции интенсивности рассеяния света за счёт собственных механических колебаний поверхности этих частиц.

2. Создана математическая модель взаимодействия ультразвуковых колебаний с дисперсной частицей, которая позволяет исследовать процессы при оптико-акустическом воздействии на дисперсную частицу.

3. Теоретически установлен временной диапазон контроля размеров частиц в зависимости от формы и длительности акустического внешнего воздействия, позволяющий уменьшить число ошибок определения размеров дисперсных частиц.

#### **Практическая значимость:**

1. Разработан новый оптико-акустический метод дистанционного контроля размеров дисперсных частиц, основанный на определении их собственных частот механических колебаний поверхности частиц по динамической составляющей рассеянного ими излучения. Новизна решения подтверждена патентом РФ № 2346261.

2. Разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий определять собственные частоты механических колебаний дисперсных частиц и находить по ним размер частиц в реальном режиме времени.

3. Результаты исследований внедрены в цехе № 1 ФКП «Бийский олеумный завод». Использование метода дистанционного определения геометрических параметров дисперсных частиц непосредственно в объёме тепло-массообменных аппаратов в ходе технологического процесса производства серной кислоты позволит снизить затраты на сырьё, уменьшить количество потерь конечной продукции и обеспечить равномерную нагрузку оборудования.

#### **Апробация работы**

Материалы диссертации обсуждались на III, IV и V Всероссийских научно-практических конференциях «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» (ИАМП),

проходивших в Бийском технологическом институте в 2002, 2003, 2004 гг. (г. Бийск), XV Международной научно-практической конференции студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии» (Томский политехнический университет).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель зависимости амплитуды колебаний поверхности дисперсной частицы от энергетических и временных параметров импульса ультразвуковых колебаний.
2. Метод дистанционного определения размеров дисперсных частиц по их собственным частотам механических колебаний для систем газ–жидкость и жидкость–жидкость.
3. Разработанный программно-аппаратный комплекс оптико-акустического дистанционного контроля размеров дисперсных частиц, по динамической составляющей рассеянного ими излучения определяющий их собственные частоты механических колебаний поверхности, что позволяет обеспечивать высокую точность измерения размеров частиц в реальном режиме времени.

**Публикации.** Основные результаты диссертации изложены в 7 опубликованных печатных работах, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РФ, список которых приводится в конце автореферата. Получен 1 патент РФ на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и результатов, списка использованных источников из 103 наименований; содержит 141 страницу машинописного текста, 39 рисунков, 8 таблиц, 4 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследований.

**В первой главе** приведен аналитический обзор по свойствам дисперсных систем и основным методам дисперсионного анализа. Наиболее подробно рассмотрены основные оптические свойства дисперсных систем и оптические методы анализа поверхностных слоев и дисперсности. Сформулированы цели и задачи исследования.

**Во второй главе** рассмотрены основные моменты теоретического описания взаимодействия зондирующего излучения с дисперсными частицами и процессы вынужденного рассеяния света в колеблющихся сферических частицах.

На основании изложенного в данном разделе можно сделать следующие выводы: пространственная структура светового поля  $B(r, \Theta)$  в экваториальном сечении оптически крупной частицы не является однородной, в нем присутствует два ярко выраженных максимума, расположенных на главном диаметре вдоль направления действия излучения вблизи освещенной и теневой поверхностей сферы; электрическое поле в частице  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$  является суммой полей на основной частоте  $\omega_L$  (частоте накачки) и на частотах комбинационного рассеяния. Т.е. одним из наиболее эффективных путей получения информации о различных дисперсных средах является исследование их оптических свойств в связи с формирующими их факторами (химический состав, включения другой фазы, наличие оболочки или ядра у частиц, оптический размер дисперсной фазы и т.д.).

**Третья глава** посвящена разработке оптического дистанционного метода контроля размеров дисперсных частиц и математической модели взаимодействия ультразвуковых колебаний с дисперсной частицей.

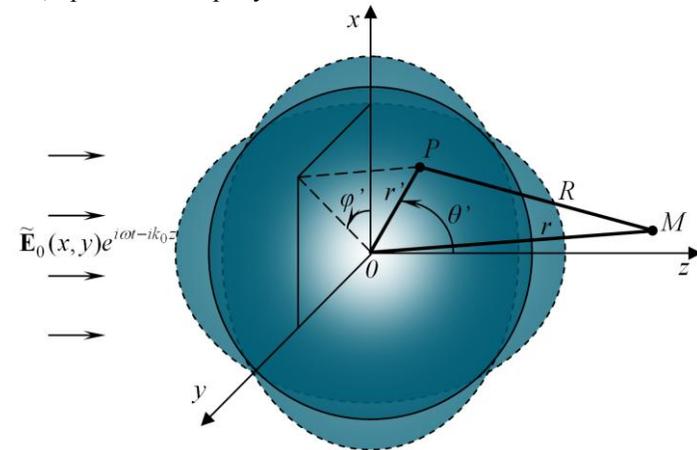
Наиболее перспективными системами дисперсного анализа по количественным и качественным характеристикам являются оптические системы. Поэтому приоритетным направлением работы была разработка оптического дистанционного метода определения геометрических параметров дисперсных частиц. В связи с чем важным моментом являлось рассмотрение задачи взаимодействия зондирующего излучения с колеблющимися дисперсными частицами.

При взаимодействии излучения с веществом прозрачной частицы во всем ее объеме возникает спонтанное неупругое рассеяние, причем в областях фокусировки внутреннего оптического поля оно наиболее интенсивно. Причиной появления комбинационных частот в сигнале рассеяния могут явиться процессы взаимодействия основной волны с молекулярными колебаниями среды. Часть волн из спектра спонтанного комбинационного излучения покидает каплю, а часть за счет полного внутреннего отражения (точнее, близкого к полному внутреннему отражению) распространяется вдоль ее поверх-

ности. На своем пути эти волны ослабляются за счет поглощения и выхода излучения через поверхность частицы, а также могут усиливаться за счет нелинейности среды. Электрическое поле в частице  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$  является суммой полей на основной частоте  $\omega_L$  (частоте накачки) и на частотах комбинационного рассеяния. При этом возникает бесконечное множество рассеянных волн с частотами  $\omega = \omega_L \pm n\omega_{vib}$ ,  $n = 1 \dots \infty$ , где  $\omega_{vib}$  – частота дипольного перехода молекул вещества. Однако первая стоксовая волна с частотой  $\omega_s = \omega_L - \omega_{vib}$  наиболее интенсивная.

Пусть на колеблющуюся частицу с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_a$  в положительном направлении оси  $z$  падает плоская линейно поляризованная электромагнитная волна:  $\mathbf{E}_0(x, y, z; t) = \tilde{\mathbf{E}}_0(x, y)e^{i\omega t - ik_0 z}$ . Необходимо найти величину поля в точке  $M$  вне частицы с радиус-вектором  $\mathbf{r}$ , определить, насколько велика будет амплитуда пульсаций интенсивности этого поля. Форма частицы слегка отлична от сферы, изменяется во времени, и рассеяние происходит на основной частоте.

Данная задача может быть сформулирована как задача об излучении объема колеблющейся частицы с заданным в нем распределением электромагнитного поля в окружающее пространство. Схема, иллюстрирующая геометрию задачи, приведена на рисунке 1.



частица находится в начале декартовой системы координат  $(x, y, z)$ , показаны также сферические координаты точки  $P$  внутри частицы  $(r', \Theta', \varphi')$ ;  $M$  – точка наблюдения с координатами  $(r, \Theta, \varphi)$

Рисунок 1 – Геометрическая схема, иллюстрирующая задачу о рассеянии световой волны частицей

Выражение для интенсивности рассеянной волны в произвольной точке  $M$ , записанное с точностью до квадратичных членов:

$$I_s(\mathbf{r}, t) = \frac{c\sqrt{\varepsilon_a}}{8\pi} \mathbf{E}_s(\mathbf{r}, t) \mathbf{E}_s^*(\mathbf{r}, t) \approx \left[ \frac{k_0^2(\varepsilon_a - 1)}{4\pi r} \right]^2 \cdot \{T(\mathbf{r}, t) T^*(\mathbf{r}, t) + 2T(\mathbf{r}, t) a_0^2 \int \mathbf{E}_a(a_0, \Theta', \varphi', t) e^{ik_a r' \cos \gamma_1} \operatorname{Re} [\sum_{n;l} \xi_{nl}(t) Y_{nl}(\Theta', \varphi') e^{i\Omega_0 t} d\omega']\}, \quad (1)$$

где  $T(\mathbf{r}, t) = \frac{c\sqrt{\varepsilon_a}}{8\pi} \int_{V_{a_0}} \mathbf{E}_a(\mathbf{r}', t) e^{ik_a r' \cos \gamma_1} d\mathbf{r}'$ ;

$c$  – скорость света в вакууме;

$\varepsilon_a$  – диэлектрическая проницаемость вещества частицы;

$\mathbf{E}_a$  – электромагнитное поле в частице при отсутствии возмущений сферической поверхности;

$a_0$  – радиус невозмущенной капли;

$k_a = m_a k_0$  – волновое число внутри частицы ( $m_a$  – показатель преломления дисперсных частиц);

$\xi(t, \Theta, \varphi) = \operatorname{Re} \{ \sum_{n;l} \xi_{nl}(t) Y_{nl}(\Theta, \varphi) \}$ ,  $n = 2, 3, \dots$ ,  $l = -n, \dots, n$  – вектор смещения поверхности частицы ( $|\xi(\Theta, \varphi)| = a(\Theta, \varphi) - a_0$ );

$\xi_{nl}$  – сферические функции Риккати–Бесселя;

$Y_{nl}(\Theta', \varphi')$  – сферические функции;

$V_{a_0}$  – объем невозмущенной сферы;

$d\omega' = \sin \Theta' d\Theta' d\varphi'$ .

Данное выражение показывает, что интенсивность рассеянного электромагнитного поля на комбинационных частотах зависит от квадрата радиуса частицы и амплитуды деформаций ее поверхности. Временная зависимость  $I_s(t)$  определяется суперпозицией колебаний на собственных частотах частицы. Квадратичная зависимость  $I_s(t)$  от  $a_0$  показывает, что с увеличением размера частицы увеличивается и ее относительный вклад в интенсивность рассеянного излучения.

Собственные частоты механических колебаний поверхности жидкой сферической частицы однозначно связаны с ее размером и физическими свойствами жидкости. Отсюда следует, что при измерении частоты собственных колебаний жидких частиц по колебаниям уровня рассеянного ими излучения зондирующего пучка становится возможным найти распределение частиц по размерам в исследуемой дисперсной системе.

В третьей главе рассмотрены три метода контроля размеров дисперсных частиц:

- 1) по распределению интенсивности рассеянного излучения на плоскости фотоприёмника;
- 2) по скорости перемещения частиц;
- 3) по собственным частотам механических колебаний поверхности частиц.

Третий метод взят за основу для разработки комплекса программно-технических средств экспериментальной установки автоматического дистанционного контроля и диагностики размеров дисперсных частиц.

Для изучения воздействия внешних сил на дисперсную частицу была разработана математическая модель взаимодействия ультразвуковых колебаний с дисперсной частицей.

При внешнем воздействии на жидкую дисперсную частицу в ее объеме возникают массовые силы, которые приводят к появлению объемного градиента плотности жидкости, движению капли как целого, а также вызывают ее деформации за счет действия поверхностных сил. Для качественного изучения зависимости амплитуды колебаний поверхности частицы от энергетических и временных параметров воздействия ультразвуковых колебаний решение проводилось для импульса (рисунок 2), временной профиль которого задавался, как:

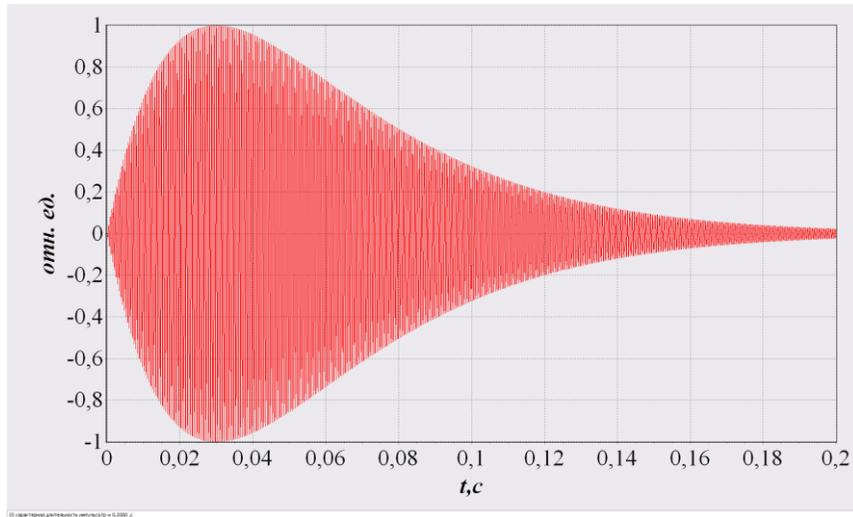
$$f_1(t) = f_n^0(a_0) \left[ I_p \frac{t}{t_p} \exp\left\{-\frac{t}{t_p}\right\} \cdot \cos(\gamma t) \right]. \quad (2)$$

Здесь  $I_p$  – пиковая интенсивность;

$t_p$  – характерная длительность импульса;

$f_n^0(a_0)$  – не зависящий от времени коэффициент, определяемый параметрами воздействующих ультразвуковых колебаний на поверхность частицы;

$\gamma$  – частота ультразвуковых колебаний.



пиковая интенсивность  $I_p = 1$ ; характерная длительность импульса  $t_p = 0,03$  с

Рисунок 2 – Временной профиль воздействия ультразвуковых колебаний

Формула (2) была принята как один из вариантов возможного воздействия ультразвуковых волн на дисперсную частицу, т.к. форма и размеры ультразвуковых излучателей, а также режимы работы ультразвуковых генераторов могут быть различными. Для того чтобы сделать математическую модель более универсальной, в формулу (2) добавлен не зависящий от времени коэффициент  $f_n^0(a_0)$ , определяемый параметрами воздействующих ультразвуковых колебаний на поверхность частицы.

Тогда выражение для смещения поверхности частиц  $x(t, n)$ :

$$x = a \exp(-\lambda t) \cdot \cos(\omega t + \varphi) + b \exp(\alpha t) \left[ \cos(\gamma t + \delta) + c \cos(\gamma t + \delta + r) \right] \quad (3)$$

где  $\lambda = \frac{1}{t_n^2}$ ;  $z = \frac{nf_n^0 I_p}{\rho_a a_0 t_p}$ ;  $\alpha = -\frac{1}{t_p}$ ;  $\omega = \sqrt{\omega_n^2 - \lambda^2}$ ;  $\omega_n^2 = \left( \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \Omega_n \right)^2$ ;

$n = 2, 3, \dots$  – номер колебательной моды;

$t_n = \frac{a_0^2}{2\nu(2n+1)(n-1)}$  – характерное время затухания колебаний капли за

счет вязких сил;

$\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;

$\Omega_n$  – собственная (рэлеевская) частота гидродинамических колебаний ка-

пли.

$$a = \frac{bc \cos(\delta + r)}{\cos(\varphi)};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b \left[ \gamma c \cos(\delta + r) + \cos(\delta) - \gamma c \sin(\delta + r) \right] \frac{\lambda}{\omega}}{\omega bc \cos(\delta + r)};$$

$$b = \frac{z}{\sqrt{m^2 + 4\gamma^2(\alpha + \lambda)^2}};$$

$$m = \alpha^2 + \omega_n^2 - \gamma^2 + 2\lambda\alpha;$$

$$\operatorname{tg}(\delta) = \frac{2\gamma(\alpha + \lambda)}{m};$$

$$c = -2 \frac{((\alpha + \lambda)^2 - m\gamma)}{\sqrt{(m + 2\gamma^2)^2 \cdot (\alpha + \lambda)^2 + (2\gamma(\alpha + \lambda)^2 - m\gamma)^2}};$$

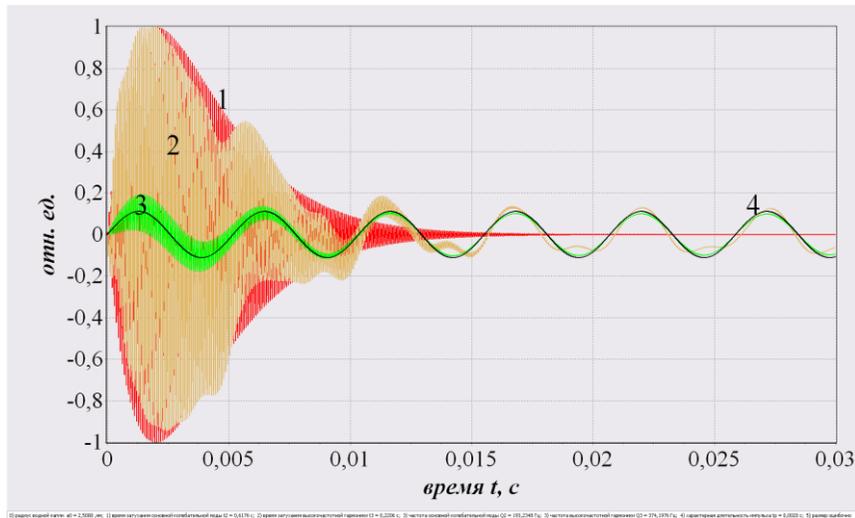
$$\operatorname{tg}(r) = \frac{2\gamma(\alpha + \lambda)^2 - m\gamma}{(m + 2\gamma^2) \cdot (\alpha + \lambda)}.$$

Для изучения зависимости амплитуды колебаний поверхности дисперсной частицы от энергетических и временных параметров воздействия ультразвуковых колебаний была разработана компьютерная программа, выполняющая расчет по заданным значениям (рисунок 3). На рисунке показана относительная временная зависимость  $f_1(t) / \max(f_1)$  воздействия на поверхность дисперсной частицы ультразвуковых колебаний, где  $f_1(t)$  рассчитывается по формуле (2). Колебания поверхности частиц представляют собой суперпозицию колебаний на разных собственных резонансных частотах. На рисунке показаны относительное смещение поверхности капли для суммы первых десяти гармоник  $\sum_{n=2}^{11} x(t, n) / \max[\sum_{n=2}^{11} x(t, n)]$ , где  $x(t, n)$  – рассчитывается по формуле (3), и относительное смещение поверхности капли для основной колебательной моды  $x(t, 2) / \max[\sum_{n=2}^{11} x(t, n)]$ . Также на графике изображена синусоида с частотой, равной собственной частоте колебаний капли  $\Omega_2$ .

С увеличением размера дисперсной частицы изменяется и характер колебаний. Их форма становится достаточно сложной, и гармонические составляющие колебаний на резонансной частоте прослеживаются неявно. При увеличении размера частицы уменьшается частотный интервал между сосед-

ними модами и, следовательно, большее количество собственных мод принимает участие в формировании возмущения поверхности частицы.

Результаты компьютерного моделирования на базе созданной математической модели позволяют оценить влияние на общую картину деформаций дисперсной частицы энергетических и временных параметров внешнего воздействия, а также произвести расчет оптимальной пиковой интенсивности и характерной длительности импульса ультразвуковых колебаний и времени затухания колебательных мод для повышения точности контроля размеров частиц. Так, для водной капли радиусом  $a_0 = 1,5$  мм при  $t_p = 0,002$  с время затухания основной колебательной моды  $0,222$  с, а собственная частота гидродинамических колебаний капли  $\Omega_2 = 415,775$  Гц.

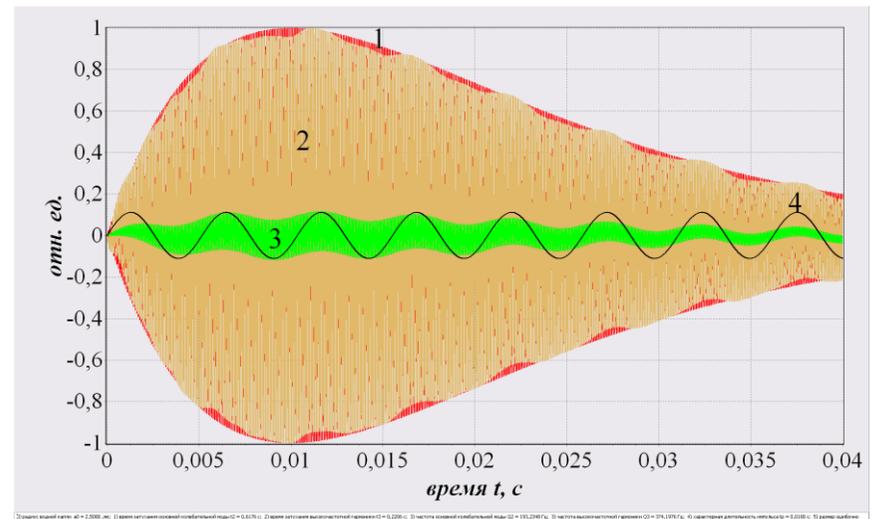


радиус невозмущенной водной капли  $a_0 = 2,5$  мм;  $t_p = 0,002$  с;  
собственная частота гидродинамических колебаний капли  $\Omega_2 = 193,235$  Гц;

- 1 – относительная временная зависимость воздействия ультразвуковых колебаний;
- 2 – относительное смещение поверхности водной капли для суммы первых десяти гармоник;
- 3 – относительное смещение поверхности водной капли для основной колебательной моды;
- 4 – синусоида с частотой, равной собственной частоте колебаний капли

Рисунок 3 – Воздействие ультразвуковых колебаний на дисперсную частицу

Из рисунка 3 видно, что при прекращении воздействия на дисперсную частицу затухание высокочастотных гармоник с течением времени происходит достаточно быстро и их влияние на общую картину деформаций жидкой частицы проявляется только на начальном этапе колебаний. Из выражения (3) следует, что в случае «коротких» воздействующих импульсов ( $t_p < t_n$ ) деформации поверхности капли происходят по гармоническому закону с «частотой»  $\omega = \sqrt{\omega_n^2 - \lambda^2}$ , экспоненциально затухая во времени. В случае «длинных» импульсов ( $t_p > t_n$ ) первое слагаемое экспоненциально убывает со временем, так что через достаточно большой промежуток времени остается только второй член, гармонические колебания капли отсутствуют, а временную зависимость смещения ее поверхности определяет форма воздействующего импульса (рисунок 4).



радиус невозмущенной водной капли  $a_0 = 2,5$  мм;  $t_p = 0,01$  с; собственная частота гидродинамических колебаний капли  $\Omega_2 = 193,235$  Гц; 1 – относительная временная зависимость воздействия ультразвуковых колебаний; 2 – относительное смещение поверхности водной капли для суммы первых десяти гармоник; 3 – относительное смещение поверхности водной капли для основной колебательной моды; 4 – синусоида с частотой, равной собственной частоте колебаний капли

Рисунок 4 – Воздействие ультразвуковых колебаний на дисперсную частицу

Как было показано ранее, в случае «коротких» воздействующих импульсов ( $t_p < t_n$ ) локальные деформации поверхности дисперсной частицы, первоначально вызываемые высокочастотными колебательными модами, в дальнейшем развиваются в эллипсоидальные колебания на частоте, близкой к основной  $\Omega_2$ . В случае капли:

$$\Omega_2 = \sqrt{8\beta/(\rho_a a_0^3)}, \quad (4)$$

где  $\beta$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости;

$\rho_a$  – плотность жидкости;

$a_0$  – радиус невозмущённой капли.

Данная математическая модель позволила подтвердить целесообразность проведения измерений после затухания высокочастотных гармоник ( $\Omega_3, \Omega_4, \dots, \Omega_n$ ), что позволяет уменьшить число ошибок определения размеров дисперсных частиц. Для практической реализации способа определения размеров дисперсных частиц наибольший интерес представляет промежуток времени после окончания внешнего воздействия на частицу и затухания высокочастотных гармоник смещения поверхности частицы и до момента затухания основной колебательной моды, т.к. форма колебания поверхности частицы во время воздействия становится достаточно сложной, и гармонические составляющие колебаний на собственных частотах прослеживаются неявно. Например, контроль размеров частиц можно проводить после момента времени  $t$ , для которого выполняется условие  $\left| \sum_{n=2}^{11} x(t, n) - x(t, 2) \right| \leq 0,1 \cdot x(t, 2)$ , и до момента затухания основной колебательной моды  $t = t_2$ .

Основная частота  $\Omega_2$  колебаний дисперсной частицы рассчитывается с использованием математической модели взаимодействия зондирующего излучения с колеблющимися дисперсными частицами по временной зависимости уровня принимаемого рассеянного излучения зондирующего пучка, а радиус невозмущённой капли определяется из соотношения

$$a_0 = 2 \cdot \sqrt[3]{\beta/(\Omega_2^2 \cdot \rho_a)}. \quad (5)$$

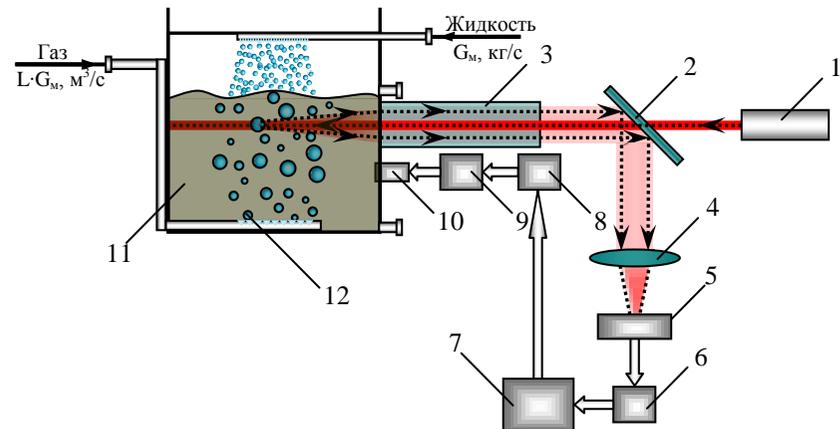
**Четвертая глава** посвящена разработке экспериментальной установки для автоматического дистанционного контроля и диагностики размеров дисперсных частиц для систем газ–жидкость и жидкость–жидкость.

В качестве теоретической основы для разработки экспериментальной установки был использован метод контроля размеров дисперсных частиц по их собственным частотам механических колебаний, рассмотренный в главе три.

На «Способ определения параметров дисперсных частиц» по их собственным частотам механических колебаний был получен патент РФ № 2346261.

Данный способ обладает следующими преимуществами перед известными аналогами: повышение точности измерительной информации о параметрах дисперсных частиц для систем газ–жидкость и жидкость–жидкость в технологических теплообменных аппаратах, в проточных средах, позволяет создавать системы автоматического дистанционного контроля и диагностики дисперсных сред.

Структурная схема экспериментальной установки для автоматического дистанционного контроля и диагностики размеров дисперсных частиц для систем газ–жидкость и жидкость–жидкость представлена на рисунке 5.



- 1 – лазер в качестве источника зондирующего излучения;  
 2 – светоделитель (полупрозрачное зеркало); 3 – световод; 4 – объектив;  
 5 – фотоприёмник; 6 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП);  
 7 – управляющая ЭВМ в качестве анализатора сигналов с АЦП и регистратора; 8 – цифроаналоговый преобразователь (ЦАП);  
 9 – ультразвуковой генератор; 10 – излучатель ультразвуковых колебаний;  
 11 – сплошная фаза; 12 – дисперсная фаза

Рисунок 5 – Структурная схема экспериментальной установки для автоматического дистанционного контроля и диагностики размеров дисперсных частиц для систем газ–жидкость и жидкость–жидкость

Устройство работает следующим образом. Исследуемая дисперсная система контактирует с многоволоконным регулярным световодом 3 и излучателем ультразвуковых колебаний 10. Зондирующее излучение с длиной волны

$\lambda$  генерируется лазером 1. Через светоделитель 2 зондирующее излучение посредством многоэлементного световода 3 подводится к дисперсионной среде (сплошной фазе) 11. При прохождении этой волны через исследуемую дисперсную систему происходит рассеяние, отражение и поглощение излучения. Рассеянное (под малыми углами относительно направления распространения) от дисперсных частиц 12 излучение проходит через многоэлементный световод 3 и попадает на светоделитель 2, который направляет его на объектив 4. Объектив 4 проецирует излучение непосредственно на фотоприёмник 5. Далее аналоговый сигнал с фотоприёмника преобразуется к цифровому виду при помощи модуля быстродействующего аналого-цифрового преобразователя 6 и поступает для дальнейшей обработки и регистрации на ЭВМ 7. ЭВМ координирует работу всех узлов системы, а именно: управляет процессом оцифровки сигнала с фотоприёмника, посредством цифро-аналогового преобразователя 8 управляет работой ультразвукового генератора 9, обрабатывает и регистрирует результаты измерений. На ЭВМ, используя математическую модель, согласно оптимальному взаимодействию ультразвуковых колебаний с дисперсными частицами, рассчитывают параметры воздействующих импульсов таким образом, чтобы колебания поверхности дисперсной частицы происходили по гармоническому закону с собственной частотой  $\Omega_n$ . При этом необходимо учитывать физические свойства дисперсной системы и характерное время затухания колебаний дисперсных частиц за счет вязких сил.

В результате проведенного информационного исследования по методам и средствам измерений и анализа основных этапов создания измерительно-вычислительных комплексов сбора, обработки аналоговой и цифровой информации были разработаны структурная схема комплекса программно-технических средств и схема экспериментальной установки для систем газ-жидкость и жидкость-жидкость, при помощи которых проводились измерения частоты основной колебательной моды дисперсных частиц (рисунок б).

Для оптимального приема динамической составляющей рассеянного сигнала на частотах механических колебаний, по сравнению с уровнем невозмущенного (упругого) рассеяния, фотоприемники лучше устанавливать в направлении поперек воздействия зондирующего излучения ( $\alpha=90^\circ$ ), а также в направлении угла первой радуги ( $\alpha \approx 137,5^\circ$ ). Для устранения внешних засветок перед фотоприемниками можно устанавливать интерференционные светофильтры. Светофильтры рассчитывать так, чтобы при отклонении длины волны излучения от максимума пропускания (655 нм) на 4 нм коэффициент пропускания уменьшался в 100 раз. Вместо излучателя ультразвуковых колебаний можно использовать электромагнитный излучатель с упругой мембраной.

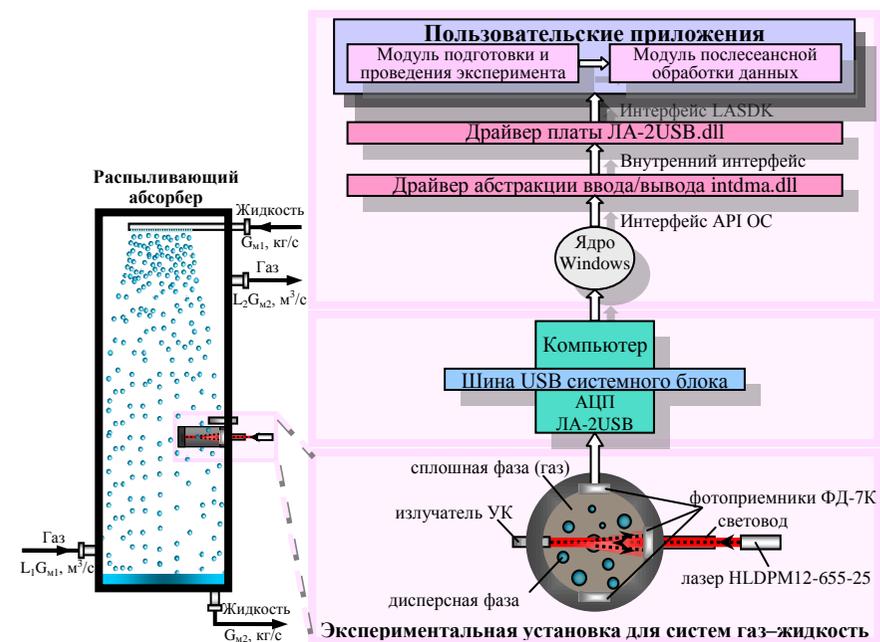


Рисунок 6 – Структурная схема комплекса программно-технических средств

С учетом структурной схемы комплекса программно-технических средств, выбора среды объектно-ориентированного программирования для создания программного комплекса подготовки и проведения эксперимента и послесекансной обработки данных была разработана структурная схема комплекса программного обеспечения, изображенная на рисунке 7.

Комплекс программного обеспечения является сложноорганизованной системой, состоящей из двух модулей, включающих в себя конечных исполнителей, оформленных в виде подсистем и внешних программ.

В модуле подготовки и проведения эксперимента определяется, сколько и каких каналов нужно для измерений, длительность измерений, параметры регистрации (частота, условия регистрации и т. д.), способы визуализации, априорная информация.

В сценарии указывается длительность проведения эксперимента, каналы, по которым будут проводиться измерения, параметры регистрации и визуализации и др. информация.

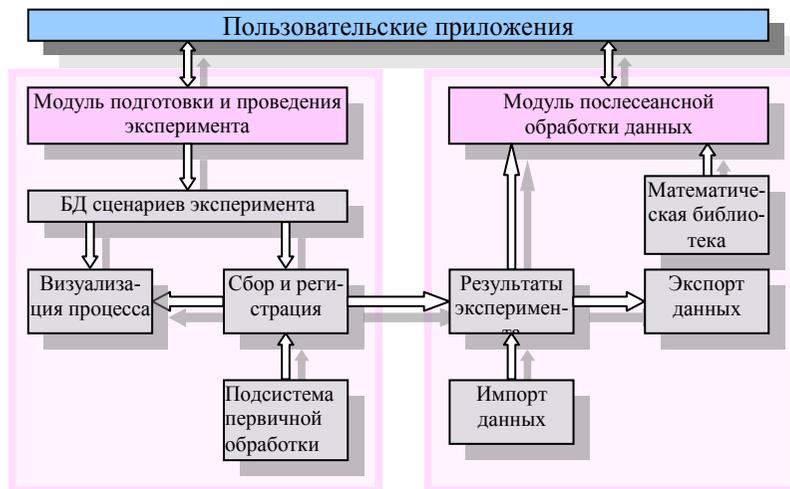
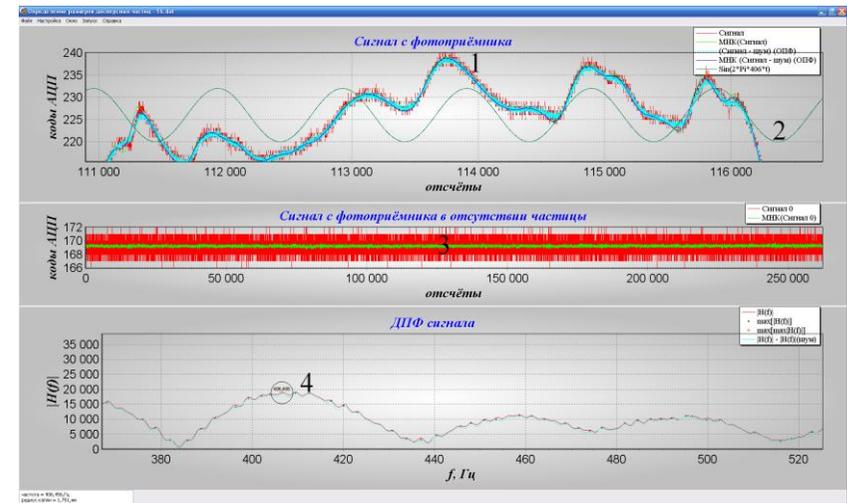


Рисунок 7 – Структурная схема комплекса программного обеспечения

При обработке экспериментальных данных разработанный комплекс программного обеспечения позволяет решать следующие задачи:

- производить математический расчет частоты основной колебательной моды дисперсной частицы, наблюдаемой в ходе эксперимента;
- рассчитывать по частоте основной колебательной моды значения  $a_{0p}$  – радиуса невозмущенной частицы;
- уменьшать влияния помех на результат измерения.

Во время работы программы происходит постоянная обработка данных, поступающих с АЦП, с целью подтверждения наличия дисперсной частицы в измерительном объеме. При обнаружении частицы в измерительном объеме, происходит сбор данных, регистрация и первичная обработка. Далее собранные данные передаются в модуль послесезанной обработки данных. В данном модуле при помощи быстрого дискретного преобразования Фурье (ДПФ) происходит обработка исходных массивов данных «Сигнал с фотоприемника» и «Сигнал с фотоприемника в отсутствии частицы». С целью повышения спектрального разрешения ДПФ исходный сигнал дополняется средними значениями. На рисунке 8 показаны увеличенные фрагмент участка исходного сигнала с фотоприемника и фрагмент ДПФ. Для визуального контроля правильности работы алгоритма расчета размера дисперсной частицы на верхнем графике добавлен график  $\text{Sin}(2 \cdot \text{Pi} \cdot \Omega_2 \cdot t)$ , с наблюдаемой в ходе эксперимента частотой основной колебательной моды  $\Omega_2$ .



радиус невозмущенной водной капли  $a_0=1,75$  мм; наблюдаемое значение частоты основной колебательной моды  $\Omega_2=406,456$  Гц (на нижнем графике выделено окружностью); рассчитанное значение радиуса капли  $a_{0p}=1,751$  мм; 1 – увеличенный фрагмент сигнала с фотоприемника после первичной обработки; 2 – график  $\text{Sin}(2 \cdot \text{Pi} \cdot \Omega_2 \cdot t)$  с наблюдаемой в ходе эксперимента частотой основной колебательной моды водной капли; 3 – сигнал с фотоприемника в момент отсутствия дисперсной частицы в измерительном объеме; 4 – увеличенный фрагмент дискретного преобразования Фурье обработанного (с целью уменьшения помех) сигнала с фотоприемника

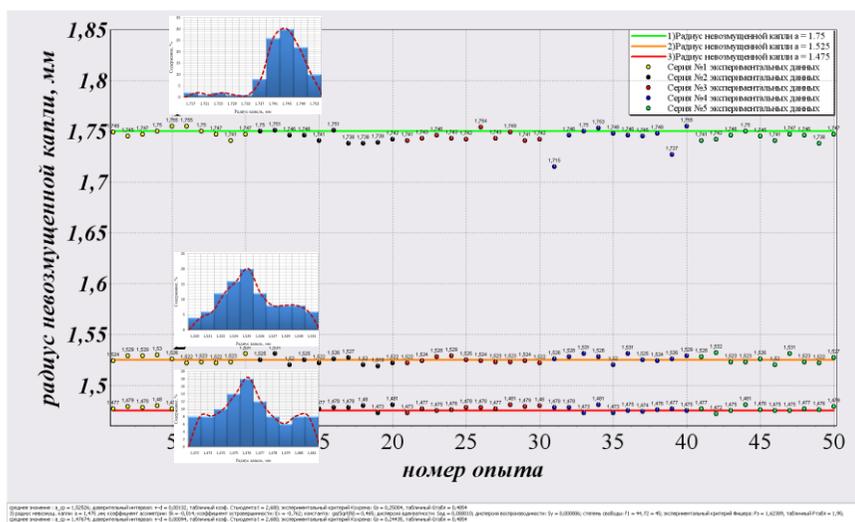
Рисунок 8 – Графики после выполнения работы модуля послесекансной обработки данных

При одновременном попадании в поле зондирующего излучения нескольких дисперсных частиц возможны ошибки определения размера частиц, связанные с тем, что за частоту основной колебательной моды  $\Omega_2$  ошибочно принимается частота высокочастотных колебательных мод ( $\Omega_3, \Omega_4, \dots, \Omega_n$ ) более крупных частиц. Данной ошибки можно избежать, уменьшая диапазон определения размеров дисперсных частиц либо определяя размер частицы с наименьшей частотой основной колебательной моды. Так, для водной капли радиусом  $a_0=2,5$  мм частота основной колебательной моды  $\Omega_2=193,235$  Гц, а частота высокочастотной гармоники  $\Omega_3=374,198$  Гц, что соответствует частоте основной колебательной моды частицы радиуса  $a_0=1,609$  мм.

В рассматриваемой экспериментальной установке (см. рисунок 6) определяется размер наиболее крупной частицы, с наименьшей частотой основной колебательной моды.

Разработанный комплекс программного обеспечения позволяет проводить измерения в присутствии помех.

С помощью разработанного программно-аппаратного комплекса были проведены серии экспериментов для водных капель различных диаметров. Для статистической обработки экспериментальных данных разработана компьютерная программа, выполняющая численный расчет доверительного интервала, критериев Фишера и Кохрена по входным данным. На рисунке 9 показан внешний вид окна программы статистической обработки экспериментальных данных с результатами измерений для трёх различных диаметров водной капли.



полученные экспериментальные данные для радиуса невозмущенной капли  $a_0 = 1,75$  мм (1);  $a_0 = 1,525$  мм (2);  $a_0 = 1,475$  мм (3)

Рисунок 9 – Окно программы обработки экспериментальных данных

Для каждого диаметра водной капли проводилось по пятьдесят измерений, после чего рассчитывались: среднее значение, доверительный интервал, критерий Кохрена и критерий Фишера.

Результаты обработки программой серий экспериментальных данных представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных (радиус невозмущенной капли: 1)  $a_0 = 1,75$  мм; 2)  $a_0 = 1,525$  мм; 3)  $a_0 = 1,475$  мм)

Среднее значение $a_0$ , мм	Доверительный интервал $\pm\Delta$ ( $P = 0,99$ ; $f = 49$ )	Дисперсия адекватности $S_{a_0}^2$	Дисперсия воспроизводимости $S_y^2$
1) 1,74496	0,00258	0,000080	0,000047
2) 1,52526	0,00132	0,000014	0,000012
3) 1,47674	0,00094	0,000010	0,000006
Критерий Кохрена ( $\alpha = 0,01$ ; $m = 5$ ; $f = 9$ )		Критерий Фишера ( $f_1 = 44$ ; $f_2 = 45$ )	
G расчетный	G табличный	F расчетный	F табличный
1) 0,26861	0,4854	1,72682	$\approx 1,950$
2) 0,25004	0,4854	1,14400	$\approx 1,950$
3) 0,24435	0,4854	1,62389	$\approx 1,950$

Для всех полученных экспериментальных данных расчетные критерии Кохрена и Фишера меньше табличного. Проведенная обработка экспериментальных данных позволила установить воспроизводимость данных. Разработанный метод и программно-аппаратный комплекс экспериментальной установки автоматического дистанционного контроля и диагностики размеров дисперсных частиц позволяют корректно определять собственные частоты механических колебаний дисперсных частиц и находить по ним размер частиц в диапазоне от 1 до 5 мм с относительной погрешностью, не превышающей 2 %.

Результаты исследований внедрены в цехе № 1 ФКП «Бийский олеумный завод».

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В итоге проведения исследовательской работы получены следующие результаты:

1. Создана математическая модель взаимодействия ультразвуковых колебаний с дисперсной частицей и проведено компьютерное моделирование, позволяющее определять колебания поверхности дисперсной частицы в зависимости от энергетических и временных параметров внешнего воздействия, производить расчет пиковой интенсивности и характерной длительности импульса ультразвуковых колебаний и времени затухания колебательных мод, для повышения точности контроля размеров частиц.

2. Разработан новый оптико-акустический метод дистанционного контроля размеров дисперсных частиц, основанный на модуляции интенсивности рассеяния света за счёт собственных механических колебаний поверхности этих частиц. Новизна решения подтверждена патентом РФ № 2346261.

3. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для автоматического дистанционного контроля и диагностики размеров частиц для систем газ–жидкость и жидкость–жидкость. Результаты обработки экспериментальных данных подтвердили возможность применения метода для определения диаметров дисперсных частиц с абсолютной погрешностью, не превышающей 0,03 мм (доверительная вероятность  $P = 0,99$ ), в диапазоне от 2,95 до 3,5 мм.

4. В результате проведенного информационного исследования по методам и средствам измерений и анализа основных этапов создания измерительно-вычислительных комплексов сбора, обработки аналоговой и цифровой информации был разработан программно-аппаратный комплекс дисперсионного анализа, позволяющий определять собственные частоты механических колебаний дисперсных частиц и находить по ним диаметры частиц в диапазоне от 1 до 5 мм с относительной погрешностью, не превышающей 2 %.

5. Результаты исследований внедрены в цехе № 1 ФКП «Бийский олеумный завод» для оптимизации параметров абсорбера распыливающего типа.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Патент № 2346261 Российская Федерация. Способ определения параметров дисперсных частиц / Максачук А.И., Леонов Г.В. Оpubл. 10.02.2009, Бюл. № 4.
2. Максачук, А.И. Способ определения параметров дисперсных частиц для систем газ–жидкость и жидкость–жидкость / А.И. Максачук, Г.В. Леонов // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: межвузовский сборник. – Бийск: АлтГТУ, 2003. – С. 159–164.
3. Максачук, А.И. Способ определения параметров дисперсных частиц / А.И. Максачук, Г.В. Леонов // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: межвузовский сборник. – Бийск: АлтГТУ, 2004. – С. 193–196.
4. Максачук, А.И. Способ определения параметров дисперсных частиц / А.И. Максачук, Г.В. Леонов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. –2005.– № 1.– С. 44–46.
5. Максачук, А.И. Определение размеров дисперсных частиц для систем газ–жидкость / А.И. Максачук, Г.В. Леонов // Электронный журнал «Исследовано в России», 018. – 2009 г. – С. 167–182, <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2009/018.pdf>.
6. Максачук, А.И. Метод и средства контроля размеров дисперсных частиц / А.И. Максачук, Г.В. Леонов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 4. – С. 38–44.
7. Максачук, А.И. Оптико-акустический метод дистанционного контроля размеров дисперсных частиц / А.И. Максачук, Г.В. Леонов // Электронный журнал «Техническая акустика». – 2009.– 4, <http://ejta.org>.

---

Подписано в печать 28.04.2009 г. Печать – ризография. Заказ № 2009-34  
Объем 1,37 п.л. Тираж 100 экз.  
Отпечатано в ВЦ БТИ АлтГТУ им. И.И. Ползунова  
659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27

