На правах рукописи

Березин Сергей Валерьевич

РАЗРАБОТКА ДИСТАНЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ТОЛЩИНЫ НЕФТЯНЫХ ПЛЕНОК НА ВЗВОЛНОВАННОЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2006 год

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом Университете им. Н. Э. Баумана Министерства образования РФ.

Научный руководитель: Доктор технических наук, с.н.с., М. Л. Белов

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор В.Е. Карасик

Кандидат технических наук А.Ф. Сильницкий

Ведущая организация: Московский энергетический институт (технический ...верситет)

Березин С.В.
Разработка дистанционного лазерного измерителя толщины нефтяных пленок на взволнованной морской...
2006
У1758027
0-00

Защита диссертации сост... ...сов на заседании диссертационного ... ...овском государственном техническом ... адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманска...

С диссертацией можн... ...им. Н.Э. Баум...

У 1758027

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

...ции, прос... ...ц. 5, МГТ...

Учен... диссе... докт... ...Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время актуальной является проблема загрязнения окружающей среды и особенно гидросферы.

Наиболее опасными по частоте и объему разливов нефти являются аварии нефтеналивных судов. В этих случаях встает задача картирования пятна нефтяного загрязнения и определения объема, вылившихся нефтепродуктов. Не менее важной является задача контроля нефтяных загрязнений на морских, озерных и речных акваториях при утечках из нефтепроводов и хранилищ нефти, при авариях в местах промыслов, пунктах заправки и перекачки топлива и т.п. Для организации работ по ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов необходима объективная информация о толщине пленки нефтяного загрязнения, которая позволяет оценить объем пролитой нефти, масштаб и сроки мероприятий по ликвидации разлива.

На сегодняшний день наиболее эффективными для дистанционного измерения толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности с авиационных носителей являются метод на основе регистрации флуоресцентного излучения и спектрофотометрический метод.

Важными преимуществами спектрофотометрического метода являются относительная простота и низкая стоимость аппаратуры. Однако задача измерения толщины пленок нефтепродуктов спектрофотометрическим методом до конца не решена.

Основными проблемами при измерении толщины пленок спектрофотометрическим методом являются:

- разработка методов измерения для пленок с толщиной сравнимой с длинами волн зондирования и меньше (для тонких пленок);
- разработка методов измерения, устойчивых к воздействию шумов и флуктуаций сигналов, для пленок с толщиной на порядок и более превышающей длины волн зондирующего излучения (для толстых пленок).

Цели и основные задачи работы

Целью работы является разработка дистанционного лазерного измерителя толщины нефтяных пленок на морской поверхности.

Основные задачи работы:

1. Обоснование использования спектрофотометрического метода для измерения толщины пленок нефтепродуктов на случайно неровной водной поверхности.
   ка методов дистанционного измерения толщины пленок с длинами дирования и меньше и пленок с толщиной на порядок и более ющей длины волн зондирующего излучения.
   е алгоритмов и программ, позволяющих проводить измерения л пленок нефтепродуктов на морской поверхности в изированном режиме.

НТБ МГТУ им Н Э Баумана
1758027
Березин С В. Разработка ди
МГТУ
им.Н.Э. БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА

4. Создание макета измерительного комплекса для контроля толщины нефтяных пленок на водной поверхности.
5. Проведение экспериментальных исследований с целью проверки работоспособности разработанных методов и алгоритмов.

Научная новизна работы

1. Разработаны новые методы дистанционного измерения толщины пленок нефтепродуктов на морской поверхности, основанные на использовании лазера с перестраиваемой длиной волны излучения, позволяющие проводить измерения тонких пленок нефтепродуктов (сравнимой с длинами волн зондирования и меньше) и толстых пленок нефтепродуктов (с толщиной на порядок и более превышающей длины волн зондирования).
2. Создан макет измерительного комплекса на основе перестраиваемого CO_2 лазера, оснащенный специальным программным обеспечением, позволяющим проводить измерения оперативно и с высокой точностью.
3. Проведены экспериментальные исследования по измерению толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности с использованием разработанных методов и созданного измерительного комплекса.

Практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы нашли практическое применение при выполнении научно-исследовательских работ по темам: «Саламандра МГТУ-Т», «Барний», «Стежок», «Синергетика ГКНО» и 8 госбюджетных НИР.

Созданный измерительный комплекс на основе перестраиваемого CO_2 лазера может послужить прототипом промышленного образца измерителя толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности.

Положения, выносимые на защиту

1. Обоснование использования спектрофотометрического метода для измерения толщины пленок нефтепродуктов на случайно неровной водной поверхности.
2. Методы дистанционного измерения толщины пленок нефтепродуктов на морской поверхности, основанные на использовании лазера с перестраиваемой длиной волны излучения, позволяющие проводить измерения тонких пленок нефтепродуктов (сравнимой с длинами волн зондирования и меньше) и толстых пленок нефтепродуктов (с толщиной на порядок и более превышающей длины волн зондирования).
3. Измерительный комплекс для контроля толщины нефтяных пленок на водной поверхности на основе перестраиваемого CO_2 лазера, оснащенный специальным программным обеспечением, позволяющим проводить измерения оперативно и с высокой точностью.
4. Результаты экспериментальных исследований по измерению толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности с использованием разработанных методов и созданного измерительного комплекса.

Апробация работы и публикации

По результатам диссертационной работы было получено 2 патента РФ, опубликовано 6 научных статей и 15 тезисов докладов.

Результаты диссертации докладывались на 13 российских и международных конференциях и симпозиумах: I-VI Научно технической конференции «Медико-технические технологии на страже здоровья» (Геленджик 1999-2001, Анталия 2002, Шарм Эль Шейх 2003); X, XI Международной научно-технической конференции "Лазеры в науке, технике, медицине" (Сочи 1999, 2000), VIII-XI Joint International symposium "Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics" (Irkutsk 2001, Tomsk 2002, 2003, 2004), Шестая международная научно-техническая конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (Владимир 2004), Международный симпозиум «Образование через науку» (Москва 2005).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения с выводами. Список цитируемых литературных источников включает 121 наименование. Общий объем работы – 143 страницы, включая 55 рисунков и 7 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Показана актуальность проблемы контроля нефтяных загрязнения морей и внутренних водоемов в связи с растущим уровнем загрязнения окружающей среды. Рассмотрена постановка задачи измерения толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности и основные возникающие при этом проблемы.

Глава 1. Сравнительный анализ методов контроля толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности

Рассматриваются методы измерения толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности их варианты. Делается заключение, что наиболее перспективными для дистанционных измерений являются лазерные методы.

Проводится анализ существующих лазерных методов измерения толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности. Рассматриваются спектрофотометрические, фотометрические и поляриметрические методы, а также методы на основе регистрации флуоресцентного излучения и излучения комбинационного рассеяния.

Анализ существующих методов показал, что на сегодняшний день наиболее эффективными для дистанционного измерения толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности с авиационных носителей являются метод на основе регистрации флуоресцентного излучения и спектрофотометрический метод.

Важными преимуществами спектрофотометрического метода и его вариантов являются относительная простота и низкая стоимость аппаратуры, а

также возможность дистанционного зондирования с больших высот, что обеспечивает большую пространственную полосу зондирования морской поверхности.

Глава 2. Физические основы дистанционного метода измерения толщины пленок нефтепродуктов, основанного на перестройке длины волны зондирующего излучения

Рассматриваются оптические характеристики воды и нефти.

Выражение для коэффициента отражения трехслойной системы «воздух – нефтяная пленка - вода» с учетом многократного отражения излучения в пленке имеет следующий вид:

$$R_{отр}(\lambda, d) = \left| \frac{(Z_1+Z_2)(Z_2-Z_3)e^{-i\alpha(\lambda)d} + (Z_1-Z_2)(Z_2+Z_3)e^{+i\alpha(\lambda)d}}{(Z_1+Z_2)(Z_2+Z_3)e^{-i\alpha(\lambda)d} + (Z_1-Z_2)(Z_2-Z_3)e^{+i\alpha(\lambda)d}} \right|^2, \qquad (1)$$

где: $\alpha(\lambda) = 2\pi m_2 / \lambda$; $Z_j = Z_j(\lambda) = 1 \cdot m_j(\lambda)$ - волновое сопротивление j-ой среды; $m_j(\lambda) = n_j(\lambda) + ik_j(\lambda)$ - комплексный показатель преломления j-ой среды; $n(\lambda)$, $k(\lambda)$ – показатели преломления и поглощения; λ- длина волны излучения лазера; d - толщина нефтяной пленки. Индексы 1,2,3 относятся, соответственно, к воздуху, нефти и воде.

Спектрофотометрический метод основан на измерении спектрального коэффициента отражения $R_{отр}(\lambda)$ системы «прозрачная пленка на подложке» для ряда длин волн выбранного участка спектра и определении на основе данных измерений длин волн $\lambda_0, \lambda_1, \ldots, \lambda_M$, соответствующих интерференционным экстремумам. На рисунке 1 показан качественный вид зависимости $R_{отр}(\lambda)$, получаемой при использовании этого метода.

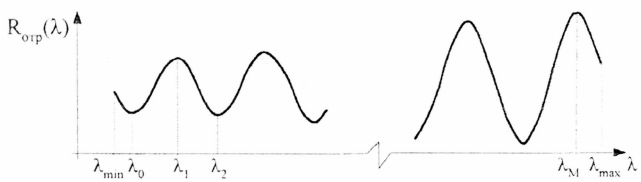

Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента отражения с несколькими интерференционными экстремумами

Толщина пленки d по этим данным определяется следующим образом:

$$d = \frac{1}{4n_2} \frac{\lambda_i \lambda_{i-1}}{\lambda_{i-1} - \lambda_i}, \qquad (2)$$

где: $i = 1,2,\ldots,M$ - номер экстремума; λ_i, λ_{i-1} - длины волн, соответствующие любым соседним экстремумам; $\bar{n}_2$ - средний показатель преломления нефтепродукта на интервале изменения длины волны $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$.

Недостатками существующих вариантов спектрофотометрического

метода являются:

- невозможность измерения толщины тонких пленок, когда число экстремумов в спектре отражения становится меньше двух;
- большое влияние на результаты измерений шумов и флуктуаций сигналов, особенно для толстых пленок с толщиной на порядок и более превышающей длины волн зондирующего излучения;
- использование широкополосных источников света, что существенно ограничивает применение метода при дистанционных измерениях.

Для дистанционных измерений, с точки зрения обеспечения необходимой мощности отраженного сигнала при облучении водной поверхности с авиационного носителя, использование лазерного источника является предпочтительным.

Анализ существующих перестраиваемых лазеров показывает, что с точки зрения наличия характеристик, в наибольшей степени подходящих для задачи лазерного дистанционного зондирования, наиболее подходящими представляются: CO_2-лазер, параметрические генераторы света и перестраиваемые лазеры на кристаллах (лазеры на кристаллах сапфира, легированного титаном Ti^{3+}:Al_2O_3, или александрита Cr^{3+}: $BeA1_2O_4$).

Глава 3. Метод контроля толщины тонких пленок нефтепродуктов на морской поверхности

Для измерения толщины пленок нефтепродуктов лазерный локатор, установленный, например, на авиационном носителе, облучает морскую поверхность узким пучком вертикально вниз на ряде длин волн зондирования.

Исследуется задача отражения лазерного пучка от случайно неровной водной поверхности с нефтяными загрязнениями. Рассмотрение проводится для волн оптического диапазона в рамках метода Кирхгофа, учитывающего зависимость отражательной способности морской поверхности от степени ее неровности и оптических характеристик границы «воздух – морская поверхность».

В рамках этого метода поле излучения, отраженного от случайно неровной водной поверхности S, можно представить в виде:

$$u(\vec{r}_п) = \frac{1}{4\pi i}\int_S G(\vec{r},\vec{r}_п)V_{отр}(\vec{r})u_o(\vec{r})[\vec{n}(\vec{r})\vec{q}(\vec{r})]\,\vec{dr}, \qquad (3)$$

где: $\vec{n}(\vec{r}) = \{n_x, n_y, n_z\}$ - единичный вектор нормали к случайно неровной водной поверхности S в точке r; $\vec{q}(\vec{r}) = -k\nabla(|\vec{r}-\vec{r}_п| + |\vec{r}_и - \vec{r}|) \approx \vec{\alpha} - \vec{\beta}$; $\vec{r}_п$, $\vec{r}_и$, $\vec{r}$ - векторы, определяющие положение точки наблюдения (приемника), источника и точки на поверхности S; $u_o(\vec{r})$ - поле лазерного источника на поверхности S; $G(\vec{r},\vec{r}_п)$ - функция Грина; $V_{отр}(\vec{r})$ - коэффициент отражения морской поверхности по полю; k - волновое число; $\vec{\alpha},\vec{\beta}$ - волновые векторы, направленные по нормали к фазовому фронту падающей на поверхность и отраженной волн, соответственно (см. рис. 2).

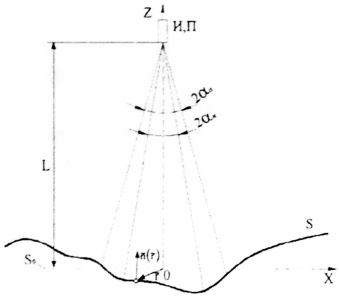

Рис. 2. Схема зондирования морской поверхности (И – источник, П - приемник)

Получена аналитическая формула для средней мощности, регистрируемой приемником локатора, при зондировании однородного участка случайно неровной водной поверхности с нефтяными загрязнениями вертикально вниз:

$$\bar{P} \simeq \frac{a_и a_п c\tau_и \sqrt{\pi} R_{отр}(\lambda)}{16\pi\left(\bar{\gamma}_x^2\bar{\gamma}_y^2\right)^{\frac{1}{2}} L^4 \left(C_и + C_п\right)\sqrt{\tau_и^2 c^2/16 + 2\sigma_\xi^2}}, \qquad (4)$$

где: $\bar{\gamma}_x^2$, $\bar{\gamma}_y^2$ - дисперсии наклонов морской поверхности вдоль осей X и Y некоторой системы координат; σ_ξ^2- дисперсия высот морской поверхности; L - расстояние от лазерного локатора до морской поверхности (высота расположения носителя); $R_{отр}(\lambda) = V_{отр}^2(\lambda)$ - коэффициент отражения для невозмущенной волнением морской поверхности на длине волны λ; $\tau_и$- длительность зондирующего импульса; c- скорость света. Для прозрачной земной атмосферы:

$$a_и = \frac{P_и(\lambda)}{\pi\alpha_и^2} e^{-\tau_a(\lambda)}, \quad a_п = r_п^2 e^{-\tau_a(\lambda)}, \quad C_{и,п} = \frac{1}{\left(\alpha_{и,п} L\right)^2},$$

где: $2\alpha_{и,п}$- угол расходимости источника излучения и угол поля зрения приемной оптической системы; $P_и(\lambda)$ - мощность, излучаемая источником лазерного локатора; $r_п$- эффективный размер приемной апертуры; τ_a - оптическая толщина земной атмосферы между локатором и морской поверхностью.

Предложен метод измерения толщины тонких пленок нефтепродуктов на водной поверхности с толщиной порядка длин волн зондирующего излучения и меньше. Метод основан на использовании перестраиваемого лазера и аппроксимации спектральной зависимости нормированной мощности сигнала отраженного от морской поверхности с нефтяным загрязнением заданными функциями (нормировка производится на мощность источника):

1. $f_1(\lambda) = AR_{отр}(\lambda, d),$ (5)

2. $$f_2(\lambda) \cong A \cdot \sin\left(\frac{4\pi n_2(\lambda)d}{\lambda} + B\right) \cdot \exp\left(-\frac{4\pi k_2(\lambda)d}{\lambda}\right) + C, \quad (6)$$

где: A, B, C, d - параметры аппроксимации.

За измеренную толщину пленки принимается параметр d, соответствующий минимуму среднеквадратичного отклонения функции аппроксимации от измеренных значений нормированной мощности отраженного сигнала.

На основе разработанного программного обеспечения проведено математическое моделирование метода измерения толщины тонких пленок нефтепродуктов. Результаты математического моделирования для аппроксимирующих функций (5) и (6), и разных относительных среднеквадратических значений шума измерения δ приведены в таблице 1. Для каждого значения заданной толщины пленки δ и относительного среднеквадратичного значения шума δ значение толщины пленки $d_в$ определялось как математическое ожидание по ста вычислениям для разных реализаций шумовой выборки. Относительная ошибка Δ вычислялась по формуле:

$$\Delta = \left|\frac{d - d_в}{d}\right| \cdot 100\% . \quad (7)$$

Таблица 1.

Относительная ошибка определения толщины пленки нефти Δ (в %).

Относительное среднеквадратичное значение шума δ, %	Аппроксимирующая функция (5)			Аппроксимирующая функция (6)		
	Заданная толщина пленки нефти, мкм			Заданная толщина пленки нефти, мкм		
	4	10	14	4	10	14
5	0,007	0,001	0,004	18,1	15,6	1,0
20	0,3	0,01	0,01	24,0	18,4	1,3
40	1,3	0,03	0,5	34,5	26,0	1,4

Результаты математического моделирования показывают, что метод, основанный на аппроксимации измеренной зависимости нормированной мощности отраженного сигнала от длины волны излучения, позволяет с приемлемой точностью определять толщину тонких пленок нефти на водной поверхности. Точность определения толщины пленки особенно высока (менее одного процента) при использовании аппроксимирующей функции (5).

Глава 4. Метод контроля толщины толстых пленок нефтепродуктов на морской поверхности

Существенным фактором при измерении толщины толстых пленок является то, что при наличии шума измерения случайные значения измеряемого сигнала приводят к очень большим ошибкам в определении положения

экстремумов в измеренной зависимости нормированной мощности отраженного сигнала от длины волны (особенно при большом числе экстремумов на диапазоне перестройки лазера). Более того, большое число экстремумов на диапазоне перестройки приводит к необходимости сильного увеличения числа длин волн зондирования (уменьшению дискрета перестройки длины волны). В случае толстых пленок также становится очень существенным влияние поглощения излучения в пленке, что приводит к уменьшению амплитуды периодической составляющей в зависимости коэффициента отражения от длины волны, которая содержит в себе информацию о толщине пленки.

Все это приводит к необходимости разработки специальных алгоритмов для измерения толщины толстых пленок нефтепродуктов. В этом случае, для надежной работы алгоритмов обработки, с помощью которых по данным измерения определяется толщина, необходимо проводить предварительное сглаживание флуктуаций в измеряемой зависимости нормированной мощности принимаемого сигнала от длины волны излучения.

На основе анализа и модернизации существующих методов сглаживания экспериментальных данных разработаны алгоритмы и программы предварительной обработки данных измерений применительно к задаче измерения толщины толстых пленок нефтепродуктов на водной поверхности. За основу были взяты следующие алгоритмы сглаживания: алгоритм сглаживания, использующий оператор текущего среднего; цифровая фильтрация со специальным выбором спектральной характеристики фильтра; алгоритмы сглаживания, с помощью кубических сплайнов.

Предложено два способа определения толщины толстых пленок нефтепродуктов на основании результатов предварительного сглаживания:

- вычисление толщины пленки d, как результат усреднения по всем парам соседних экстремумов в сглаженной зависимости нормированной мощности, регистрируемой приемником, от длины волн лазера:

$$d = \frac{1}{4M}\sum_{i=1}^{M}\frac{\lambda_i\lambda_{i-1}}{\lambda_i n_2(\lambda_{i-1}) - \lambda_{i-1} n_2(\lambda_i)}; \qquad (8)$$

- вычисление толщины пленки d, используя специально выбранную тройку соседних экстремумов:

$$d = \frac{1}{2n_2(\lambda_i)}\cdot\frac{\lambda_{i-1}\lambda_{i+1}}{\lambda_{i+1}-\lambda_{i-1}}, \qquad (9)$$

где: $i = 0,1...M$ - номер экстремума; M+1 – число экстремумов на интервале $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$; λ_{i-1}, λ_i и λ_{i+1} - длины волн соседних экстремумов; $n_2(\lambda_i)$- показатель преломления нефтепродукта на длине волны λ_i.

Тройка экстремумов в (9) выбирается по наилучшему удовлетворению условия, связывающего соседние экстремумы $\lambda_{i-1}, \lambda_i, \lambda_{i+1}$ в сглаженной зависимости нормированной мощности, регистрируемой приемником, от длины волны лазера:

$$\left|\frac{\lambda_i}{n_2(\lambda_i)} - 2\frac{\lambda_{i+1}\lambda_{i-1}}{\lambda_{i+1}n_2(\lambda_{i-1}) + \lambda_{i-1}n_2(\lambda_{i+1})}\right| \to \min,\ i = 1,2...M-1 \qquad (10)$$

Это условие получено из анализа спектральной зависимости коэффициента отражения системы «воздух – нефтяная пленка - вода».

На основе разработанного программного обеспечения проведено математическое моделирование метода измерения толщины толстых пленок нефтепродуктов.

В таблице 2 приведены результаты математического моделирования определения толщины пленки нефти при использовании различных методов предварительного сглаживания и для различных относительных среднеквадратических значений шума измерения δ. При определении толщины пленки по сглаженной смоделированной зависимости нормированной мощности от длины волны использовалась формула (9). Толщина пленки нефти задавалась равной 100 мкм. Диапазон изменения длины волны зондирования 9 – 11мкм с шагом 0,02 мкм. Для каждого значения заданной толщины пленки d и относительного среднеквадратичного значения шума δ значение толщины пленки d_B определялось как математическое ожидание по ста вычислениям для разных реализаций шумовой выборки. Цифрами в таблице 2 обозначены: 1 - цифровая фильтрация со специальным выбором спектральной характеристики фильтра, 2 – сглаживание кубическим сплайном с заданным параметром сглаживания, 3 - сглаживание кубическим сплайном с критерием максимальной гладкости, 4 - сглаживание оператором текущего среднего, 5 - без предварительной обработки. Результаты для разных методов сглаживания расположены в соответствии с возрастанием ошибки измерения.

Таблица 2.

Относительная ошибка определения толщины пленки нефти (в %)

Относительное среднеквадратичное значение шума δ, %	Метод предварительной обработки данных измерения				
	1	2	3	4	5
1	0,2	0,07	0,3	2,2	5,6
10	1,0	1,0	0,2	120,2	386,0
20	1,4	3,0	3,8	207,5	431,9
30	2,4	12,9	28,7	254,0	442,2
40	2,8	25,7	50,4	278,9	445,7
50	3,2	36,2	60,9	290,5	449,8

Таблица 2 показывает:

1. в случае отсутствия предварительного сглаживания или при использовании стандартного метода сглаживания, которым является оператор текущего среднего, ошибки восстановления толщины нефтяной пленки могут достигать сотен процентов, т.е. толщину пленки в этом случае определить невозможно.

2. метод предварительного сглаживания, основанный на цифровой фильтрации со специальным выбором спектральной характеристики, дает наименьшую погрешность, по сравнению с методами, основанными на использовании кубических сплайнов, для больших относительных среднеквадратичных значений шума (20% и более).

Для проверки эффективности разработанного алгоритма предварительной цифровой фильтрации со специальным выбором спектральной характеристики фильтра (с точки зрения точности определения толщины пленок нефтепродуктов) проводилось подробное математическое моделирование работы этого алгоритма предварительной обработки и определение толщины пленок по полученным сглаженным зависимостям.

Результаты математического моделирования определения толщины пленки нефти, после использования разработанного алгоритма предварительной фильтрации принимаемого сигнала, для толщины пленки нефти 80, 120 и 160 мкм и различных относительных среднеквадратичных значений шума измерения δ приведены в таблице 3. Для каждого значения заданной толщины пленки d и относительного среднеквадратичного значения шума δ значение толщины пленки $d_в$ определялось как математическое ожидание по ста вычислениям для разных реализаций шумовой выборки.

Таблица 3.

Относительная ошибка определения толщины пленки нефти (в %)

Относительное среднеквадратичное значение шума δ, %	Заданная толщина пленки нефти d , мкм					
	80		120		160	
	формула (8)	формула (9)	формула (8)	формула (9)	формула (8)	формула (9)
1	1,2	1,0	0,4	0,5	0,4	0,2
10	1,3	1,1	0,9	1,3	7,9	4,8
20	1,4	1,4	1,8	2,1	15,2	9,5
30	2,1	1,4	2,1	2,2	18,2	13,8
40	3,5	2,0	3,5	3,9	22,6	15,3
50	3,7	2,0	6,5	4,6	24,5	17,0

Таблица 3 показывает, что даже при больших шумах измерения (δ=50%) разработанный метод позволяет (хотя и с заметной при d=160 мкм погрешностью) определить толщину пленки нефти на водной поверхности. При небольшом уровне шума (до 10%) ошибки определения толщины пленки нефти не превышают единиц процентов. С увеличением толщины пленки нефти ошибка измерения возрастает, что в основном связано с увеличением поглощения в пленке, а значит с уменьшением амплитуды периодической составляющей в зависимости коэффициента отражения от длины волны. Из

таблицы также видно, что для определения толщины пленки по данным измерения предпочтительнее использовать формулу (9), хотя различия по сравнению с формулой (8) незначительные.

Глава 5. Измерительный комплекс для контроля толщины нефтяных пленок на водной поверхности

На рисунке 3 представлена оптическая схема, а на рисунке 4 - фотография макета автоматизированного измерительного комплекса для контроля толщины нефтяных пленок на водной поверхности. Кювета с водой и пленкой нефтепродукта находится на полу и на фотографии не показана (см. рис. 4).

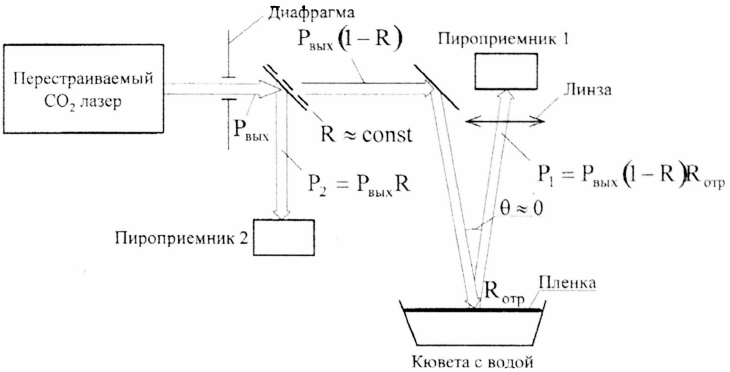

Рис. 3. Оптическая схема измерительного комплекса

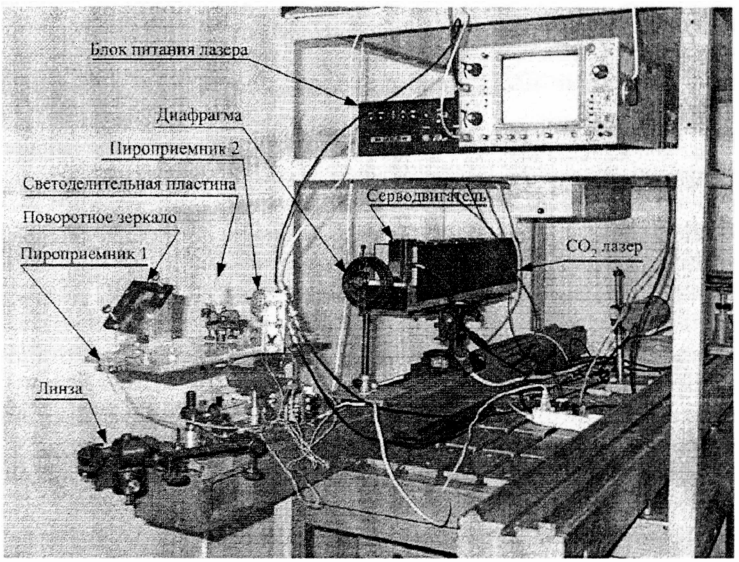

Рис. 4. Фотография измерительного комплекса

На рисунке 3: $P_{вых}$ - средняя мощность излучения на фиксированной длине волны; R- коэффициент отражения светоделительной пластины; P_1 - средняя мощность излучения лазера, регистрируемая пироприемником 1 (мощность в измерительном канале); P_2 - средняя мощность излучения лазера, регистрируемая пироприемником 2 (мощность в опорном канале).

В качестве источника излучения в измерительном комплексе используется дискретно перестраиваемый CO_2 лазер с высокочастотной накачкой, имеющий около 64 линий генерации в диапазоне 9,2-10,7 мкм.

Для измерения мощности отраженного от пленки лазерного сигнала (измерительный сигнал) и мощности опорного сигнала используются пироприемники МГ-30. Опорный сигнал служит для нормировки мощности измерительного сигнала.

Таким образом, отношение мощности излучения, попадающего на пироприемник 2, к мощности излучения, регистрируемой пироприемником 1, прямо пропорционально коэффициенту отражения от пленки. Коэффициент пропорциональности определяется коэффициентом отражения светоделительной пластины. Зависимость пропускания пластины от длины волны предполагается очень слабой и не учитывается.

Пироприемники формируют электрический сигнал, амплитуда которого пропорциональна средней мощности падающего на него излучения на заданной длине волны. Причем коэффициент пропорциональности предполагается примерно постоянным для всех линий генерации лазера.

Процесс измерения заключается в управлении перестройкой длины волны лазера с помощью серводвигателя и осуществляется командами по параллельному интерфейсу ЭВМ. А также в измерении амплитуды электрических сигналов, снимаемых с пироприемников с помощью стандартной звуковой платы, которая используется как аналого-цифровой преобразователь.

Для измерительного комплекса создано специальное программное обеспечение, позволяющее управлять процессом измерение толщины пленок нефтепродуктов, который можно разделить на несколько этапов:

1. измерение значений мощности сигналов опорного канала и отраженного излучения на всех линиях генерации лазера;
2. построение зависимости нормированной мощности отраженного излучения от длины волны;
3. обработка результатов измерений по специальным алгоритмам и определение толщины нефтяной пленки.

Необходимой входной информацией для измерительного комплекса являются оптические характеристики исследуемых веществ, которые могут задаваться либо из базы данных, либо вводиться вручную.

Созданное программное обеспечение измерительного комплекса позволяет проводить измерения толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности в автоматизированном режиме. Время единичного измерения составляет единицы секунд.

Описана методика проведения экспериментальных исследований по измерению толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности с помощью разработанного измерительного комплекса.

На рисунках 5-8, в качестве примера, приведены результаты обработки экспериментальных данных для различных действительных значений толщины пленки. Ромбами на рисунках обозначены измеренные нормированные мощности отраженного сигнала, сплошной кривой – результат сглаживания измеренных зависимостей, $d_{эт}$ – действительная («эталонная») толщина пленки, $d_в$ – измеренная толщина пленки; Δ- относительная ошибка измерения. Действительное значение толщины пленки определялось как отношение заданного объема нефтепродукта, к диаметру образовавшегося на поверхности воды пятна после растекания нефтепродукта.

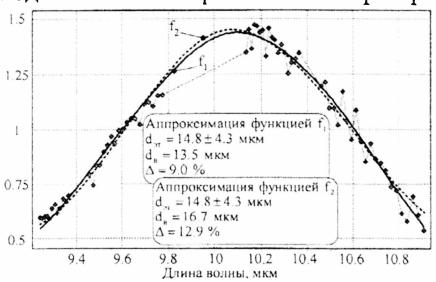

Рис. 5. Результаты измерений $d_{эт} \cong 14.8$ мкм

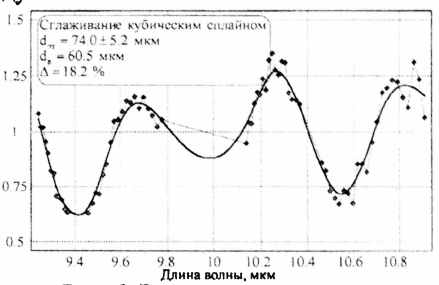

Рис. 6. Результаты измерений $d_{эт} \cong 74.0$ мкм

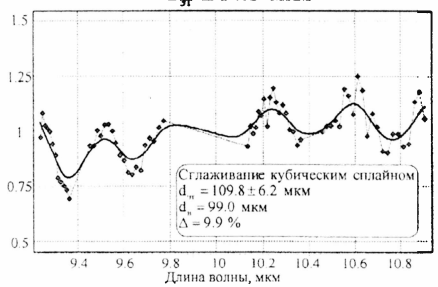

Рис. 7. Результаты измерений $d_{эт} \cong 109.8$ мкм

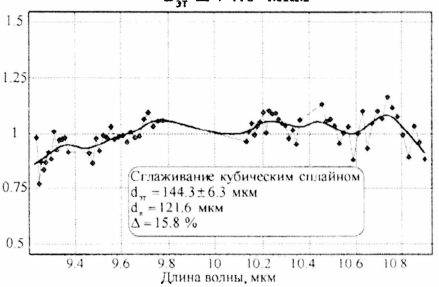

Рис. 8. Результаты измерений $d_{эт} \cong 144.3$ мкм

В качестве нефтепродукта в экспериментах использовался бензин марки АИ-95.

Экспериментальные исследования показали, что точность определения толщины пленок по данным измерений не хуже 10-20%.

Энергетический расчет самолетного варианта измерительного комплекса для контроля толщины нефтяных пленок на водной поверхности показал, что полученная для высот полета 250 и 500 м мощность лазерного передатчика соответствует реально достижимой для современных перестраиваемых CO_2 лазеров.

Выводы и заключение

1. Проведено обоснование использования спектрофотометрического метода для измерения толщины пленок нефтепродуктов на случайно неровной водной поверхности.
2. Разработаны методы дистанционного измерения толщины пленок нефтепродуктов на морской поверхности, основанные на использовании лазера с перестраиваемой длиной волны излучения.

   Метод измерения толщины тонких пленок нефтепродуктов с толщиной сравнимой с длинами волн зондирующего излучения и меньше использует аппроксимацию измеренной зависимости мощности отраженного сигнала некоторой заданной функцией. Разработанный метод обеспечивает точность определения толщины пленок нефти единицы процентов и менее. Диапазон измеряемых толщин при относительном среднеквадратичном значении шума измерения 10% и интервале длин волн лазера 9...11 мкм составляет 0.1 мкм – 165 мкм.

   Метод измерения толщины толстых пленок нефтепродуктов с толщиной на порядок и более превышающей длины волны зондирующего излучения использует предварительное сглаживание зависимости нормированной мощности принятого сигнала от длины волны зондирования и анализ положения экстремумов в этой зависимости. Разработанный метод обеспечивает точность определения толщины пленок нефти не хуже единиц процентов. Диапазон измеряемых толщин при относительном среднеквадратичном значении шума измерения 10% и интервале длин волн лазера 9...11 мкм составляет 25 мкм – 220 мкм.
3. Разработан и создан макет измерительного комплекса для контроля толщины нефтяных пленок на водной поверхности. Особенностью созданного комплекса является использование разработанных методов определения толщины пленок и сопряжение лазерного измерителя толщины нефтяных пленок с персональным компьютером, оснащенным разработанным программным обеспечением, что позволяет автоматизировать процесс измерения. Время единичного измерения составляет единицы секунд.
4. На созданном макете измерительного комплекса проведены экспериментальные исследования. Результаты экспериментальных исследований показывают, что в лабораторных условиях разработанные методы позволяют определять толщину пленки нефтепродукта на водной поверхности с точность 10-20%.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Математическое моделирование работы алгоритмов восстановления толщины пленок нефтепродуктов по данным дистанционных лазерных измерений / М.Л. Белов, С.В. Березин, В.А. Городничев и др. // Медико-технические технологии на страже здоровья: Тез. докл. всерос. научно-технической конференции. - Москва, 1999. - С.133-134.

2. Дистанционный лазерный метод измерения толщины тонких пленок

нефтепродуктов на водной поверхности / М.Л. Белов, С.В. Березин, В.А. Городничев и др. // Лазеры в науке, технике, медицине: Тез. докл. XI международной научно-технической конференции. - Москва, 2000. - С.107-108.

3. Лазерный метод контроля толщины тонких пленок нефтепродуктов на водной поверхности / М.Л. Белов, С.В. Березин, В.А. Городничев и др. // Лазеры в науке, технике, медицине: Тез. докл. X международной научно-технической конференции. - Москва, 1999. - С.142-143.

4. Обработка сигналов лазерного измерителя толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности / М.Л. Белов, С.В. Березин, В.А. Городничев и др. // Медико-технические технологии на страже здоровья: Тез. докл. всерос. научно-технической конференции. - Москва, 2000. - ч.2, С.25-26.

5. Патент 2168151 РФ, МКИ G01B11/06. Дистанционный способ измерения толщины пленок / М.Л. Белов, С.В. Березин, В.А. Городничев, В.И. Козинцев. - №99116933/28; Заявл. 04.08.1999; Опубл. 27.05.2001, Бюл. №15.- 3с.: ил.

6. Remote control of oil film thickness on water surface using laser / M.L. Belov, S.V. Berezin, V.A Gorodnichev et al. // Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics: 8 Joint International symposium. - Irkutsk, 2001. - P. 161.

7. Восстановление толщины толстой пленки нефтепродуктов на водной поверхности по данным лидарных измерений / М.Л. Белов, С.В. Березин, В.А. Городничев и др. // Медико-технические технологии на страже здоровья: Тез. докл. всерос. научно-технической конференции. - Москва, 2001. - С. 64.

8. Дистанционный лазерный метод измерения толщины нефтяных пленок на морской поверхности / М.Л. Белов, С.В. Березин, В.А. Городничев и др. // Медико-технические технологии на страже здоровья: Тез. докл. всерос. научно-технической конференции. - Москва, 2001. - С.72.

9. Контроль толщины толстых пленок нефтепродуктов на водной поверхности / М.Л. Белов, С.В. Березин, В.А. Городничев и др. // Биомедицинская радиоэлектроника. - 2001. - №11. - С.45-50.

10. Метод контроля толщины тонких пленок нефтепродуктов на водной поверхности, основанный на использовании лазера с перестраиваемой длиной волны излучения / М.Л. Белов, С.В. Березин, В.А. Городничев и др. // Оптика атмосферы и океана. - 2002. - Т.15, №2. - С.203-205.

11. Measurement of thick oil film on rough sea surface based on remote laser monitoring / M.L. Belov, S.V. Berezin, V.A Gorodnichev et al. // Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics: 9 Joint International symposium. - Tomsk, 2002. - P. 25.

12. Сравнительный анализ лазерных методов измерения толщины пленок нефтепродуктов / М.Л. Белов, С.В. Березин, В.А. Городничев и др. // Медико-технические технологии на страже здоровья: Тез. докл. всерос. научно-технической конференции. - Москва, 2002. - С.99.

13. Математическое моделирование работы алгоритмов восстановления толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности по данным лидарных измерений / М.Л. Белов, С.В. Березин, В.А. Городничев и др. // Медико-

технические технологии на страже здоровья: Тез. докл. всерос. научно-технической конференции. - Москва, 2002. - С.100.

14. Дистанционный лазерный метод измерения толщины пленки нефтепродуктов на взволнованной морской поверхности / Н.А. Бахтинов, М.Л. Белов, С.В. Березин и др. // Записки горного института. – 2001. – Т.149. – С. 53-55.

15. Дистанционный лазерный метод контроля толщины тонких пленок нефтепродуктов на водной поверхности / М.Л. Белов, С.В. Березин, В.А. Городничев и др. // Вестник МГТУ. Приборостроение. - 2002 - № 4. С.36-42.

16. Лидарный метод измерения толщины нефтяных пленок нефтепродуктов на взволнованной морской поверхности / М.Л. Белов, С.В. Березин, В.А. Городничев и др. // Вестник МГТУ. Приборостроение. - 2003 - № 1. - С. 62-69.

17. Experimental measurements of oil film thickness on the water surface by the tunable laser / M.L. Belov, S.V. Berezin, A.G. Brovkin et al. // Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics: 10Joint International symposium. - Tomsk, 2003. - P. 139.

18. Патент 2207501 РФ, МКИ G01B11/06. Способ измерения толщины пленок на подложке / М.Л. Белов, С.В. Березин, В.А. Городничев, В.И. Козинцев. - №2001117702/28; Заявл. 29.06.2001; Опубл. 27.06.2003, Бюл. №18.- 4с.: ил.

19. Автоматизированный измерительный комплекс для контроля толщины нефтяных загрязнений на водной поверхности / М.Л. Белов, С.В. Березин, А.Г. Бровкин и др. // Медико-технические технологии на страже здоровья: Тез. докл. всерос. научно-технической конференции. - Москва, 2003. - С.109.

20. Автоматизированный измерительный комплекс для контроля толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности / М.Л. Белов, С.В. Березин, А.Г. Бровкин и др. // Биомедицинская радиоэлектроника. - 2003. - №10. - С.57-61.

21. Лазерные методы измерения толщины пленок нефтепродуктов на морской поверхности / М.Л. Белов, С.В. Березин, В.А. Городничев и др. // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: Тез. докл. международной научно-технической конференции. - Владимир, 2004. - С.97-99.

22 Remote laser method for thickness measurement of petrochemical films on the water surface / M.L. Belov, S.V. Berezin, V.A. Gorodnichev et al. // Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics: 11Joint International symposium. - Tomsk, 2004. - P.157.

23. Измерительный комплекс для определения толщины нефтяных пленок на водной поверхности / М.Л. Белов, С.В. Березин, В.А. Городничев и др. // Образование через науку: Тез. докл. международного симпозиума. – Москва, 2005. - С.329-330.

Подписано к печати 10.04.06. Заказ №159 Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана