УДК 621.378:551.508

М.Л. БЕЛОВ, С.В. БЕРЕЗИН, В.А. ГОРОДНИЧЕВ,
В.И. КОЗИНЦЕВ, Ю.В. ФЕДОТОВ
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА ОСНОВЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ПО ДЛИНЕ ВОЛНЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНОК НЕФТЕПРОДУКТОВ НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Разработан макет автоматизированного лазерного измерительного комплекса для дистанционного контроля толщины пленок нефти и нефтепродуктов на водной поверхности (например, взволнованной морской поверхности). Описаны новый, разработанный авторами, многоспектральный лазерный метод измерения толщины пленок нефти и нефтепродуктов на водной поверхности, основанный на использовании дискретно перестраиваемого по длине волны источника лазерного излучения, а также структура и состав автоматизированного лазерного измерительного комплекса.

The paper is dedicated to development of automated laser measurement complex for distant control of oil and petroleum films thickness on the water surface (for example, rough sea surface). A method of oil and petroleum films thickness measurements on the water surface is described. The new multispectral laser method is based on discretely tunable laser source usage. A composition and a structure of the automated laser measured complex are described.

Загрязнения нефтепродуктами наиболее оперативно обнаруживаются дистанционными методами, позволяющими инспектировать обширные водные поверхности за сравнительно малый промежуток времени. Одним из наиболее перспективных дистанционных методов является лазерный метод зондирования [3].

Коэффициент отражения $V^2 = R_{\text{отр}}$ трехслойной системы воздух – пленка нефти – вода [1, 2] (при облучении водной поверхности вертикально вниз)

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

где $Z_j = 1/m_j$ – волновое сопротивление j-й среды; $m = n + ik$ – комплексный показатель преломления среды; n и k – показатели преломления и поглощения среды соответственно; $\alpha(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} m_2$; λ – длина волны излучения лазера; d – толщина нефтяной пленки; 1, 2 и 3 – индексы, указывающие на параметры соответственно воздуха, нефти и воды.

Как видно из формулы коэффициент отражения $R_{\text{отр}}$ (а, значит и интенсивность излучения, регистрируемая приемником лазерного измерителя) зависит от толщины нефтяной пленки d, и поэтому величину d можно восстановить по измерениям интенсивности отраженного излучения.

Наиболее перспективным при измерениях толщины нефтяной пленки является использование лазерного источника с перестраиваемой длиной волны излучения. Толщину нефтяной пленки можно определить, если плавно или дискретно менять длину волны лазерного излучения в пределах некоторого спектрального интервала и регистрировать отраженный лазерный сигнал. При наличии на водной поверхности нефтяной

пленки зависимость интенсивности отраженного сигнала от длины волны излучения является периодической функцией. Период T изменения коэффициента отражения $R_{\text{отр}}$ по переменной λ зависит от толщины нефтяной пленки:

$$T = \frac{1}{2n_2 d}\lambda_j \lambda_{j+1},$$

где λ_j, λ_{j+1} – положение соседних экстремумов функции $R_{\text{отр}}(\lambda)$; $j = 0, \ldots, N$; $N + 1$ – число экстремумов функции $R_{\text{отр}}(\lambda)$ на диапазоне перестройки лазера.

Известны способы измерения толщины пленки, основанные на использовании перестраиваемого по длине волны излучения и регистрации зависимости интенсивности отраженного излучения от длины волны. Согласно этим способам, толщину пленки определяют, анализируя зависимость интенсивности отраженного сигнала от длины волны и измеряя расстояния между максимумами или минимумами или число экстремумов (максимумов или минимумов) на диапазоне перестройки длины волны излучения лазерного источника. При известном периоде T толщина пленки

$$d = \frac{1}{2n_2 T}\lambda_j \lambda_{j+1}.$$

Недостатком этих способов является невозможность измерения толщины тонких пленок, когда число экстремумов в зависимости интенсивности отраженного излучения от длины волны становится меньше двух.

Чтобы избежать этого недостатка и проводить измерение толщины как толстых пленок нефтепродуктов, так и тонких (когда на диапазоне перестройки имеется лишь один экстремум или даже ни одного) можно использовать специальный алгоритм обработки, основанный на аппроксимации измеренной зависимости интенсивности отраженного сигнала от длины волны излучения некоторой заданной функцией. Эта аппроксимирующая функция может быть функцией, представляющей собой выражение для коэффициента отражения по интенсивности трехслойной системы воздух – пленка нефти – вода, или синусоидальной функцией.

Аппроксимация осуществляется методом наименьших квадратов по полученным отсчетам принятого сигнала на выбранном диапазоне длин волн. Ищется глобальный минимум функции среднеквадратического отклонения аппроксимирующей функции и данных измерений. Параметры аппроксимации (и толщина нефтяной пленки) определяются численно при наилучшем соответствии данных измерений аппроксимирующей функции.

Для проверки работоспособности описанного метода разработан макет измерительного комплекса для определения толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности. В качестве источника излучения предполагается использовать непрерывный перестраиваемый CO_2-лазер с ВЧ-накачкой и выходной мощностью излучения 1-3 Вт, имеющий около 70 линий генерации в диапазоне 9,2-10,8 мкм. Излучение лазера модулируется обтюратором. Для контроля выходной мощности лазера используется пироприемник МГ-30, на который с помощью светоделительной пластины из фторида бария направляется часть лазерного излучения.

Блок управления осуществляет связь по последовательному интерфейсу с персональным компьютером и выдает сигналы на перестройку лазеру. В блоке управления осуществляется предварительная обработка измеряемых сигналов: аналоговая фильтрация, оцифровка, отбраковка аномальных результатов.

При измерении толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности лазерный измеритель работает в комплексе с персональным компьютером типа IBM PC со специально разработанным программным обеспечением.

Выводы

1. Результаты математического моделирования показывают, что алгоритм, основанный на аппроксимации измеренной

зависимости интенсивности отраженного сигнала от длины волны функцией известного вида и поиске параметров аппроксимации, позволяет с приемлемой точностью определять толщину пленок нефти. Точность восстановления толщины пленок нефти особенно высока (несколько процентов и менее) при толщине нефтяной пленки 6-100 мкм.

2. Разработан макет измерительного комплекса для определения толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Борн М.* Основы оптики / М.Борн, Э.Вольф. М.: Наука, 1970.

2. *Гуревич И.Я.* Отражение видимого и ИК-излучения нефтяными пленками на море / И.Я.Гуревич, К.С.Шифрин // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Новосибирск: Наука, 1979.

3. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987.