

# Лазерный метод контроля тонких пленок нефтепродуктов на водной поверхности, основанный на измерении первой и второй производных коэффициента отражения

М.Л. Белов, А.М. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козинцев\*

НИИ радиоэлектроники и лазерной техники  
Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана  
107005, г. Москва, 2-я Бауманская, 5

Поступила в редакцию 12.01.2011 г.

Исследуется метод контроля тонких пленок нефтепродуктов на водной поверхности, основанный на измерении первой и второй производных коэффициента отражения поверхности. Математическое моделирование показывает, что метод позволяет с высокой достоверностью обнаруживать тонкие пленки нефтепродуктов и измерять на водной поверхности толщины пленок от 0,1 до 10 мкм с погрешностью не более 30% при среднеквадратическом значении шума 0,3%. С уменьшением толщины пленки погрешность уменьшается и в диапазоне толщин 0,1–2 мкм в большинстве случаев погрешность не хуже 3%.

*Ключевые слова:* лазер, водная поверхность, пленки нефтепродуктов, обнаружение, измерение толщины; laser, water surface, oil films, detection, measurement of thickness.

Наиболее эффективные методы для неконтактного или дистанционного контроля нефтяных загрязнений на водной поверхности на сегодняшний день — это лазерные флуоресцентный и спектрофотометрический методы (см., например, [1–9]). При этом указанные методы являются скорее не конкурирующими, а взаимодополняющими. Важным преимуществом флуоресцентных методов является возможность комплексного решения задачи контроля нефтяных загрязнений — обнаружения, измерения толщины пленок и их классификации. А преимуществом спектрофотометрических методов заключается в сравнительной простоте аппаратуры (и, следовательно, ее относительно низкой стоимости) и возможности дистанционного зондирования с больших расстояний.

Для тонких пленок нефтепродуктов (в экспериментах получены толщины пленок, составляющие единицы и десятые доли микрометров, см., например, [1, 2, 7]) существующие методы имеют общий недостаток — невысокую надежность обнаружения и большие погрешности измерения толщины пленок.

Известные спектрофотометрические методы предполагают использование либо перестраиваемого в широком спектральном диапазоне источника излучения, либо нескольких лазеров. Ниже рассматривается спектрофотометрический метод контроля тонких пленок нефтепродуктов на водной поверх-

ности, для которого можно применять один лазер, перестраиваемый по длине волны в узком спектральном диапазоне.

Будем считать, что лазер облучает водную поверхность вертикально вниз (например, при дистанционном зондировании с авиационного носителя или при неконтактных измерениях лазерным прибором). Мощность лазерного сигнала, регистрируемая приемником, пропорциональна коэффициенту отражения водной поверхности (чистой или загрязненной нефтепродуктом). Зависимость коэффициента отражения трехслойной системы «воздух — пленка нефтепродукта — вода» от толщины пленки и длины волны излучения является физической основой лазерных спектрофотометрических методов измерения толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности (см., например, [8, 9]).

При вертикальном падении излучения на водную поверхность коэффициент отражения  $R_{ref}(\lambda, d)$  трехслойной системы «воздух — пленка нефтепродукта — вода» имеет вид [9, 10]:

$$R_{ref}(\lambda, d) \cong \frac{r_{12}^2 + r_{23}^2 T^2(\lambda) + 2r_{12}r_{23}T(\lambda)\cos[2\beta(\lambda, d)]}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 T^2(\lambda) + 2r_{12}r_{23}T(\lambda)\cos[2\beta(\lambda, d)]}, \quad (1)$$

где

$$T(\lambda) = \exp\left(-\frac{4\pi k_2 d}{\lambda}\right); \quad \beta(\lambda, d) = \frac{2\pi d}{\lambda} n_2;$$

$$r_{23} = \sqrt{\frac{(n_2 - n_3)^2 + (k_2 - k_3)^2}{(n_2 + n_3)^2 + (k_2 + k_3)^2}}, \quad r_{12} = -\sqrt{\frac{(1 - n_2)^2 + k_2^2}{(1 + n_2)^2 + k_2^2}};$$

\* Михаил Леонидович Белов (ekomonit@bmstu.ru, belov@bmstu.ru); Алексей Михайлович Белов; Виктор Александрович Городничев; Валентин Иванович Козинцев.

$n_{2,3}$ ,  $k_{2,3}$  – показатели преломления и поглощения нефтепродукта и воды соответственно;  $d$  – толщина пленки;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $r_{12}^2$ ,  $r_{23}^2$  – коэффициенты отражения на границе сред «воздух – нефть» и «нефть – вода»;  $T(\lambda)$  – пропускание пленки нефтепродукта; индексы 1, 2, 3 относятся к воздуху, нефтепродукту и воде (для воздуха показатель преломления принят равным 1, а показатель поглощения 0).

Учтем, что пропускание тонких пленок близко к единице:  $T(\lambda) \cong 1$ , а  $n_{2,3}$  и  $k_{2,3}$  слабо зависят от длины волны. Тогда, используя формулу (1), после ряда преобразований для определения  $d$  имеем

$$\left| \frac{B_{ref}''(\lambda, d) + \frac{2}{\lambda} B_{ref}'(\lambda, d)}{B_{ref}(\lambda, d)} \right|^{1/2} \frac{\lambda^2}{4\pi n_2} = d, \quad (2)$$

где

$$B_{ref}(\lambda, d) = \frac{R_{ref}(\lambda, d)(1 + r_{12}^2 r_{23}^2) - r_{12}^2 - r_{23}^2}{2r_{12} r_{23} (1 - R_{ref}(\lambda, d))}. \quad (3)$$

Таким образом, для определения толщины пленки необходимо найти коэффициент  $R_{ref}(\lambda, d)$  (по данным измерений мощности излучения, отраженного от исследуемой водной поверхности), его первую  $R_{ref}'(\lambda, d)$  и вторую  $R_{ref}''(\lambda, d)$  производные (по длине волны излучения) и найти функцию  $B_{ref}(\lambda, d)$  и ее производные.

Измерение первой и второй производных коэффициента отражения может быть реализовано, например, с помощью лазера, перестраиваемого по длине волны в узком спектральном диапазоне по гармоническому закону. Амплитуды первой и второй гармоник мощности принимаемого сигнала при этом будут однозначно связаны с амплитудами первой и второй гармоник коэффициента отражения, которые, в свою очередь, однозначно связаны соответственно с первой и второй производными коэффициента отражения.

При этом (как показывает моделирование) амплитуда вариаций длины волны излучения лазера, с одной стороны, не должна быть больше 10–20 нм (чтобы не нарушалась линейная связь производных с амплитудами гармоник коэффициента отражения и не проявлялась спектральная зависимость оптических констант нефтепродукта и воды), а с другой – должна быть достаточно большой – единицы нанометров и более (для обеспечения достаточной амплитуды вариаций спектрального коэффициента отражения на фоне шумов).

Исследование возможностей описанного способа измерения толщины пленок на водной поверхности проводилось методом математического моделирования для «типичной» нефти [11]. На рис. 1 иллюстрируется зависимость коэффициента отражения трехслойной системы «воздух – пленка нефтепродукта – вода» от длины волны (для толщины пленки 2 мкм в диапазоне перестройки длины волны 0,8–0,81 мкм).

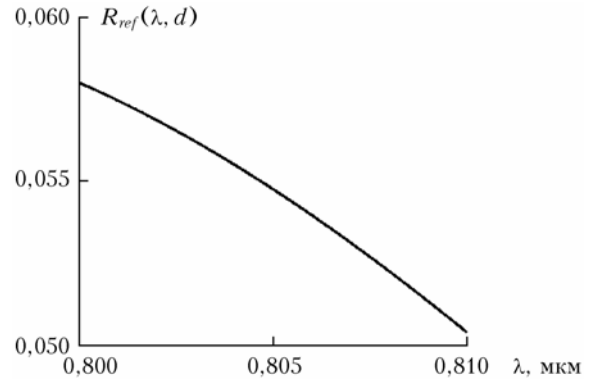


Рис. 1. Зависимость коэффициента отражения трехслойной системы «воздух – пленка нефтепродукта – вода» от длины волны

На рис. 2 показана зависимость найденного значения толщины пленки  $d_n$  от действительного значения  $d$  в диапазоне толщин пленки 0,1–10 мкм в случае, когда относительное среднеквадратическое значение шума измерения  $\sigma$  равно 0,3% (для центральной длины волны излучения 0,8 мкм и амплитуды вариаций длины волны 0,004 мкм).

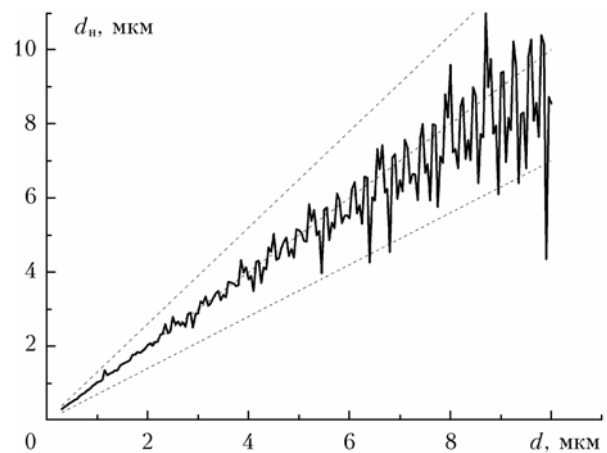


Рис. 2. Зависимость найденного значения толщины пленки от действительного значения толщины

В области  $B_{ref}(\lambda, d) \sim 0$  для определения  $d$  вместо формулы (2) использовалось приближенное решение, устраняющее возникающую неопределенность.

Пунктирные линии показывают действительное значение толщины и 30%-е отличие найденного значения  $d_n$  от действительного значения  $d$ .

Результаты моделирования показывают, что метод, основанный на определении первой и второй производных коэффициента отражения, позволяет определять толщины пленок от 0,1 до 10 мкм с погрешностью не более 30%. С уменьшением толщины пленки погрешность уменьшается, и в диапазоне толщин 0,1–2 мкм она в большинстве случаев не хуже 3%.

Для тонких пленок возникают трудности не только в измерении их толщины, но и вообще в их обнаружении. Для них возможны ситуации (в условиях

шумов измерения), когда коэффициент отражения  $R_{ref}(\lambda, d)$  оказывается [в точках минимума  $R_{ref}(\lambda, d)$ ] примерно равным и даже меньшим коэффициента отражения на границе сред «воздух – вода»  $n_{13}^2$  (рис. 3, где приведены результаты расчетов для длины волны 0,8 мкм). Это не позволяет проводить надежное обнаружение тонких пленок нефтепродуктов на водной поверхности.

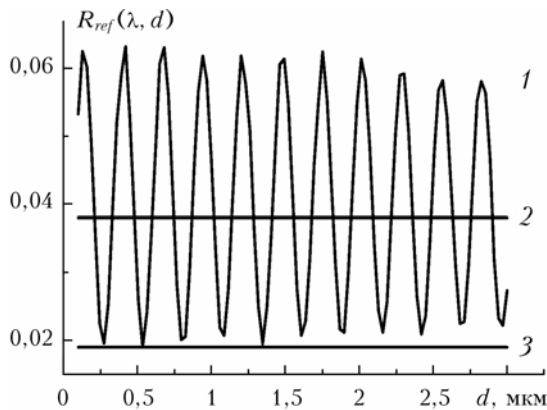


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения трехслойной системы «воздух – пленка нефтепродукта – вода» от толщины пленки: 1 –  $R_{ref}(\lambda, d)$ ; 2 –  $n_{12}^2$ ; 3 –  $n_{13}^2$

Рис. 3 приведен для случая  $\sigma = 2\%$ , однако подобные ситуации возможны и при гораздо меньшем шуме (но они будут более редкие).

Для увеличения вероятности правильного обнаружения тонких пленок нефтепродуктов на водной поверхности необходимо привлекать дополнительную информацию. Для точек минимума  $R_{ref}(\lambda, d)$  (и близких к ним точек) такой дополнительной информацией может быть величина второй производной коэффициента отражения. Алгоритм обнаружения может быть пороговым: если измеренные коэффициент отражения и (или) его вторая производная меньше некоторых пороговых значений, то принимается решение об отсутствии нефтяных пленок на водной поверхности. Пороговые значения для коэффициента отражения и его второй производной выбираются из условия максимума вероятности правильного обнаружения  $P_{п.о}$  пленок нефтепродуктов при приемлемом значении вероятности ложных тревог  $P_{л.т}$ .

Результаты математического моделирования обнаружения тонких нефтяных пленок показаны в таблице.

**Вероятность правильного обнаружения тонких нефтяных пленок**

Толщина пленки, мкм	$P_{п.о}$		Толщина пленки, мкм	$P_{п.о}$	
	1	2		1	2
0,269	0,01110	1,00000	1,347	0,92460	1,00000
0,539	0,09050	1,00000	1,616	0,98880	1,00000
0,808	0,34600	1,00000	1,886	0,99940	1,00000
1,077	0,771010	1,00000	2,155	0,99990	1,00000

Здесь приведены вероятности  $P_{п.о}$  в точках минимума коэффициента отражения  $R_{ref}(\lambda, d)$  (см. рис. 3). Моделирование проводилось при тех же условиях, что и для рис. 2, при  $\sigma = 1\%$  для двух методов обнаружения: метода, использующего измерение только  $R_{ref}(\lambda, d)$  (колонка 1), и метода, использующего измерение  $R_{ref}(\lambda, d)$  и его второй производной (колонка 2).

Из таблицы видно, что второй метод обеспечивает вероятность  $P_{п.о}$ , практически равную единице. Он имеет преимущество и по величине вероятности ложных тревог: для первого метода  $P_{л.т}$  примерно равно  $4 \cdot 10^{-4}$ , а для второго метода меньше  $10^{-5}$ .

Таким образом, результаты моделирования показывают, что лазерный метод, основанный на измерении первой и второй производных коэффициента отражения, позволяет с высокой достоверностью обнаруживать тонкие пленки нефтепродуктов и измерять на водной поверхности толщины пленок нефтепродуктов от 0,1 до 10 мкм с погрешностью не более 30% при среднеквадратическом значении шума 0,3%. С уменьшением толщины пленки погрешность уменьшается и в диапазоне толщин 0,1–2 мкм в большинстве случаев не хуже 3%.

1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
2. Оптико-физические средства исследования океана / Под ред. Е.Г. Пашенко. Л.: Судостроение, 1984. 264 с.
3. Климкин В.М., Сокоиков В.Г., Федорищев В.Н. Новые возможности дистанционного анализа нефтепродуктов на поверхности вод // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6, № 2. С. 189–204.
4. Таер Абд Дейдан, Пацаева С.В., Фадеев В.В., Южаков В.И. Флуоресцентные исследования нефтепродуктов в тонких пленках // Вестн. МГУ. Сер. 3. 1994. Т. 35, № 2. С. 51–55.
5. Таер Абд Дейдан, Пацаева С.В., Фадеев В.В., Южаков В.И. Спектральные особенности флуоресценции нефтепродуктов в пленках и в объеме воды // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7, № 4. С. 455–463.
6. Климкин В.М., Федорищев В.Н. Исследование возможности подавления сигналов фоновой флуоресценции в задачах дистанционного обнаружения нефтяных пленок // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8, № 4. С. 632–639.
7. Жевлаков А.П., Лещенко Д.О., Пакконен С.А., Сидоренко В.М. Дистанционное измерение толщины пленки нефтепродуктов на поверхности воды с использованием эксимерного лазера // Изв. РАН. Сер. Физ. 1994. Т. 58, № 2. С. 175–179.
8. Белов М.Л., Березин С.В., Городничев В.А., Козинцев В.И. Метод контроля толщины тонких пленок нефтепродуктов на водной поверхности, основанный на использовании лазера с перестраиваемой длиной волны излучения // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15, № 2. С. 203–205.
9. Козинцев В.И., Белов М.Л., Городничев В.А., Смирнова О.А., Федотов Ю.В. Лазерный метод измерения толщины пленок нефти на взволнованной морской поверхности, основанный на определении разности набега фаз в пленке для длин волн зондирования // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 10. С. 932–935.
10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.

*M.L. Belov, A.M. Belov, V.A. Gorodnichev, V.I. Kozintsev.* **Laser method of control for thin oil films on water surface based on measurement of first-order and second-order derivatives of reflection coefficient.**

In this paper laser method of control for thin oil film on water surface is considered, based on measurement of first-order and second-order derivatives of reflection coefficient. Mathematical modeling shows that the method allows to detect thin oil film with high reliability and to conduct measurement of oil film thickness from 0.1 to 10  $\mu\text{m}$  with the root-mean-square error less than 30% at a relative root-mean-square value of measurement noise of 0.3%. The root-mean-square error decreases with decrease of film thickness and for range of oil film thickness of 0.1–2  $\mu\text{m}$  in most cases the root-mean-square error is less than 3%.