

УДК 551.501

М. Л. Белов, В. А. Городничев,
В. И. Козинцев, Ю. В. Федотов
**ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК
НЕФТИ НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
ПО ВТОРОЙ ПРОИЗВОДНОЙ КОЭФФИЦИЕНТА
ОТРАЖЕНИЯ**

Разработан метод измерения толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности, основанный на определении второй производной коэффициента отражения, позволяющий измерять на водной поверхности толщину тонких (от десятых долей микрометра до 5 мкм) пленок нефтепродуктов с погрешностью не более 20 %.

Ключевые слова: водная поверхность, нефть, тонкие пленки, лазер.

Наиболее эффективными методами для неконтактного или дистанционного измерения толщины пленок нефти и нефтепродуктов на водной поверхности в настоящее время являются лазерные флуоресцентный и спектрофотометрический методы [1–5].

Преимуществом спектрофотометрического метода является относительная простота аппаратуры и, следовательно, ее относительно низкая стоимость. Однако спектрофотометрический метод предполагает проведение многоспектральных измерений. Поэтому недостаток его заключается в необходимости использования либо перестраиваемого в широком спектральном диапазоне источника лазерного излучения, либо нескольких неперестраиваемых лазеров. Например, в работах [2–4] описан метод, использующий дискретно перестраиваемый по длине волны СО₂-лазер, имеющий около 70 линий генерации в диапазоне от 9,2 до 10,8 мкм. В работе [5] рассмотрен лазерный спектрофотометрический метод измерения толщины тонких пленок нефтепродуктов, использующий только четыре длины волны зондирования и предполагающий использование четырех неперестраиваемых диодных лазеров ближнего или среднего ИК диапазонов спектра.

Далее приведено описание спектрофотометрического метода измерения толщины пленок нефтепродуктов, который основан на определении второй производной (по длине волны) коэффициента отражения системы воздух–пленка нефтепродукта–вода и для реализации которого может быть использован один перестраиваемый по длине волны в узком спектральном диапазоне лазер ближнего или среднего ИК диапазонов спектра.

Узкий пучок ИК-излучения направляется на водную поверхность вертикально вниз. В горизонтальной плоскости на высоте h (над водной поверхностью) соосно с падающим пучком расположен приемный объектив диаметром $D_{\text{п}}$. Считаем, что диаметр пучка $D_{\text{л.п}}$ на водной поверхности достаточно мал, так что в пределах пятна подсвета уравнение водной поверхности $\xi(x, y)$ можно представить в приближенном виде, содержащем только первые и вторые производные. Тогда уравнение водной поверхности $\xi(x, y)$ [6] можно записать как

$$\xi(x, y) \cong \xi_x x + \xi_y y + \frac{1}{2} \varpi_x x^2 + \frac{1}{2} \varpi_y y^2,$$

где ξ_x, ξ_y — уклоны поверхности (тангенсы углов наклонов) вдоль осей x, y (декартовой системы координат, начало которой расположено в точке пересечения оси пучка с поверхностью), лежащих в горизонтальной плоскости; ϖ_x, ϖ_y — главные кривизны поверхности в точке начала координат.

При $D_{\text{л.п.}} \ll D_{\text{п}}$ в ближней зоне зондирования (определяемой условием $h \ll \frac{D_{\text{п}}}{2|\varpi_{x,y}|D_{\text{л.п}}}$) мощность $P_{\text{п}}$ принимаемого сигнала (от блика на водной поверхности) можно представить в виде [6]

$$P_{\text{п}} = P_o R_{ref}(\lambda), \quad (1)$$

где P_o — мощность, излучаемая источником; $R_{ref}(\lambda)$ — коэффициент отражения поверхности; λ — длина волны зондирующего излучения.

В случае присутствия на водной поверхности нефтяных загрязнений коэффициент отражения $R_{ref}(\lambda)$ будет зависеть не только от длины волны излучения, но и от толщины d нефтяной пленки. При вертикальном падении излучения для коэффициента $R_{ref}(\lambda, d)$ отражения трехслойной системы воздух — пленка нефтепродукта — вода имеем [7]

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

где

$$T(\lambda) = \exp\left(-\frac{4\pi k_2(\lambda)d}{\lambda}\right); \quad r_{12} = \sqrt{\frac{(1 - n_2(\lambda))^2 + k_2^2(\lambda)}{(1 + n_2(\lambda))^2 + k_2^2(\lambda)}};$$

$$r_{23} = \sqrt{\frac{(n_2(\lambda) - n_3(\lambda))^2 + (k_2(\lambda) - k_3(\lambda))^2}{(n_2(\lambda) + n_3(\lambda))^2 + (k_2(\lambda) + k_3(\lambda))^2}}; \quad \beta(\lambda, d) = \frac{2\pi d}{\lambda} n_2(\lambda);$$

$n_{2,3}(\lambda), k_{2,3}(\lambda)$ — показатели преломления и поглощения нефти и воды; r_{12}, r_{23} — коэффициенты отражения на границе сред воздух — нефть и нефть — вода; $T(\lambda)$ — пропускание пленки нефти.

Часто для коэффициента отражения $R_{ref}(\lambda, d)$ вместо формулы (2) используют более простое приближенное выражение, учитывая, что

величины $r_{12}^2 r_{23}^2$ и $2r_{12}r_{23} \cos[2\beta(\lambda, d)]$ малы по сравнению с единицей):

$$R_{ref}(\lambda, d) \cong r_{12}^2 + r_{23}^2 T^2(\lambda) + 2r_{12}r_{23}T(\lambda) \cos[2\beta(\lambda, d)]. \quad (3)$$

Формулы (1)–(3) показывают, что при измерениях в ближней зоне зондирования можно определить коэффициент отражения $R_{ref}(\lambda, d)$ и по нему найти толщину пленки d . Однако значение $R_{ref}(\lambda, d)$ из-за интерференции излучения, отраженного от границ раздела воздух – пленка нефтепродукта и пленка нефтепродукта – вода сложным образом зависит от длины волны излучения λ , толщины пленки d и характеристик воды и нефтепродукта.

Эффект интерференции приводит к тому, что результат измерений коэффициента отражения $R_{ref}(\lambda, d)$ на одной длине волны зондирования λ не однозначно определяет толщину пленки d . Эта неоднозначность для тонких пленок может быть устранена методами, например, описанными в работах [2–5]. Более простым является приведенный далее лазерный спектрофотометрический метод измерения толщины тонких пленок нефтепродуктов.

Сначала для простоты используем формулу (3) и учтем, что для тонких пленок $T(\lambda) \cong 1$, т.е. пропускание пленки на длине волны зондирования близко к единице. Таким образом, можно записать

$$R_{ref}(\lambda, d) \cong r_{12}^2 + r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda} n_2\right). \quad (4)$$

Найдем первую и вторую производные $R_{ref}(\lambda, d)$ по λ , учитывая, что параметры r_{12} , r_{23} и n_2 изменяются по λ во много раз более медленнее, чем параметр $\cos[2\beta(\lambda, d)]$:

$$R'_{ref}(\lambda, d) \cong 2r_{12}r_{23} \sin\left(\frac{4\pi d}{\lambda} n_2\right) \cdot \frac{4\pi d}{\lambda^2} n_2; \quad (5)$$

$$R''_{ref}(\lambda, d) \cong -2r_{12}r_{23} \cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda} n_2\right) \cdot \left(\frac{4\pi d}{\lambda^2} n_2\right)^2 - 4r_{12}r_{23} \sin\left(\frac{4\pi d}{\lambda} n_2\right) \cdot \frac{4\pi d}{\lambda^3} n_2. \quad (6)$$

Из уравнений (4)–(6) после преобразований получаем

$$\left| \frac{R''_{ref}(\lambda, d) + \frac{2}{\lambda} R'_{ref}(\lambda, d)}{R_{ref}(\lambda, d) - r_{12}^2 - r_{23}^2} \right|^{\frac{1}{2}} \frac{\lambda^2}{4\pi n_2} = d. \quad (7)$$

Таким образом, коэффициент отражения системы воздух – пленка нефтепродукта – вода, первая и вторая производные ($R_{ref}(\lambda, d)$, $R'_{ref}(\lambda, d)$, $R''_{ref}(\lambda, d)$ в правой части уравнения (7)) позволяют найти толщину пленки нефтепродукта d на водной поверхности.

Более точное выражение (основанное не на приближенной формуле (3), а на формуле (2)) для определения толщины пленки d можно представить как

$$\left| \frac{B'_{ref}(\lambda, d) + \frac{2}{\lambda} B_{ref}(\lambda, d)}{B_{ref}(\lambda, d)} \right|^{\frac{1}{2}} \frac{\lambda^2}{4\pi n_2} = d, \quad (8)$$

где

$$B_{ref}(\lambda, d) = \frac{R_{ref}(\lambda, d)(1 + r_{12}^2 r_{23}^2) - r_{12}^2 - r_{23}^2}{2r_{12} r_{23} (1 - R_{ref}(\lambda, d))}. \quad (9)$$

Таким образом, для определения толщины пленки нефтепродукта необходимо найти коэффициент отражения системы воздух – пленка нефтепродукта – вода, его первую и вторую производные, что может быть реализовано, при использовании одного перестраиваемого по длине волны в узком диапазоне лазера ближнего или среднего ИК диапазонов спектра.

Возможности описанного метода измерения толщины тонких пленок нефти на водной поверхности исследовали методом математического моделирования для типичной нефти [8].

На рис. 1 показана зависимость найденного по формуле (8) значения толщины пленки d_n от действительного (заданного при математическом моделировании) значения толщины d для длины волны зондирования 0,8 мкм в случае отсутствия шума измерения. Производные, входящие в формулу (8), вычисляли приближенно по известным формулам для численного дифференцирования, используя данные измерения коэффициента отражения на пяти близко расположенных длинах волн, мкм: $\lambda_1 = 0,8 - 2\Delta\lambda$, $\lambda_2 = 0,8 - \Delta\lambda$, $\lambda_3 = 0,8$, $\lambda_4 = 0,8 + \Delta\lambda$, $\lambda_5 = 0,8 + 2\Delta\lambda$, $\Delta\lambda = 0,2 \cdot 10^{-3}$. Видно, что в идеальных условиях, когда пропускание пленки очень близко к единице ($T(\lambda) \cong 1$) и шумы измерения отсутствуют, алгоритм измерения (8) позволяет определять d в очень широком диапазоне толщин пленки.

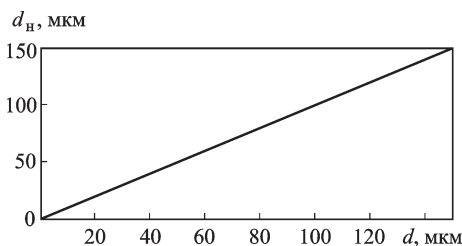


Рис. 1. Зависимость найденного значения толщины пленки от действительного значения толщины в отсутствии шума измерения; $\Delta\lambda = 0,2$ нм

Такие хорошие результаты получены вследствие очень маленького выбранного значения $\Delta\lambda = 0,2$ нм, поэтому первая и вторая производные вычисляются с большой точностью.

В условиях шумов метод измерения толщины пленок нефти, основанный на определении первой и второй производных коэффициента отражения, из-за ошибок их

вычисления становится неустойчивым в условиях даже очень небольших шумов.

На рис. 2, *а* показана зависимость найденного значения толщины пленки d_n от действительного значения толщины d в случае, когда относительное среднеквадратическое значение шума измерения равно 0,03 % (остальные условия те же, что и для рис. 1). Штриховые линии на рис. 2 показывают действительное значение толщины и 20 %-ное отклонение найденного значения толщины пленки d_n от действительного значения толщины d . Видно, что даже при таком небольшом шуме определить толщину пленки не удается.

Для уменьшения ошибок, вызванных шумами измерения, приходится увеличивать шаг дискретизации $\Delta\lambda$, что, в свою очередь, существенно ухудшает точность вычисления первой и второй производной коэффициента отражения и приводит к уменьшению диапазона измеряемых толщин пленок. Для снижения влияния шумов и отличия пропускания пленки от единицы на результаты определения d использовались также специальные процедуры обработки (усреднение результатов измерения коэффициента отражения; сглаживание или регрессия для спектральной зависимости коэффициента отражения; аппроксимация сглаженных зависимостей функциями известного вида и т.п.).

На рис. 2, *б* показана зависимость найденного значения толщины пленки d_n от действительного значения толщины d в случае шума измерения со среднеквадратическим значением 1 %. Здесь приведены характерные результаты моделирования для случая усреднения результатов по серии из 300 измерений для длины волны зондирования 0,8 мкм и $\Delta\lambda = 7,5$ нм (использовались данные измерения коэффициента отражения на шести близко расположенных длинах волн). Здесь

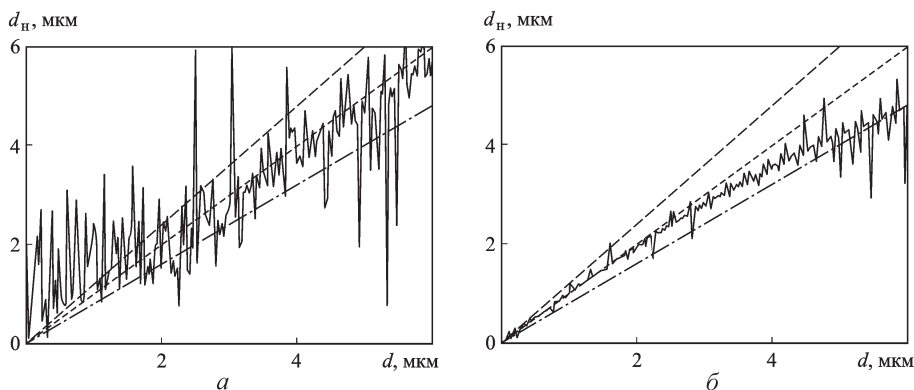


Рис. 2. Зависимость найденного значения толщины пленки от действительного значения толщины для относительного среднеквадратического значения шума измерения 0,03 % (*а*) и 1 % (*б*); $\Delta\lambda = 0,2$ (*а*) и 7,5 нм (*б*)

так же, как и на рис. 2, а, штриховая кривая, пересекающая рис. 2, б по диагонали, — это зависимость, для которой найденное значение толщины пленки совпадает с действительным. Две другие штриховые линии — 20%-ное отклонение найденного значения толщины пленки d_n от действительного значения толщины d . Из рис. 2, б видно, что метод, основанный на соотношении (8), позволяет с точностью порядка 20 % определять толщину пленки от долей микрометров до примерно 5 мкм.

Точность определения толщины пленки d в условиях шума измерения также можно повысить, используя аналогичный (описанным процедурам, основанным на использовании аналитических формул) численный алгоритм определения d , построенный на поиске минимума невязки:

$$\left\{ \sum_{i=1}^5 [R_{ref}(\lambda_i) - R_{ref.mod}(\lambda_i, d)]^2 \right\}^{1/2}, \quad (10)$$

где $R_{ref}(\lambda_i)$ — определяется из данных измерений на длинах волн зондирования λ_i ; $R_{ref.mod}(\lambda_i, d)$ — модельные значения соответствующих величин, зависящие от толщины пленки d .

Таким образом, результаты моделирования показывают, что метод, основанный на нахождении второй производной коэффициента отражения, позволяет определять на водной поверхности толщины тонких пленок нефтепродуктов от десятых долей микрометра до, по крайней мере, 5 мкм с погрешностью не более 20 % при среднеквадратическом значении шума измерения 1 % и серии из 300 измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. — М.: Мир, 1987. — 550 с.
2. 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 атмосферы и океана. — 2002. — Т. 15. № 2. — С. 203–205.
3. Белов М. Л., Березин С. В., Городничев В. А., Козинцев В. И. Дистанционный лазерный метод контроля толщины тонких пленок нефтепродуктов на водной поверхности // Вестник МГТУ. Серия “Приборостроение”. — 2002. — № 4 — С. 36–42.
4. Белов М. Л., Березин С. В., Городничев В. А., Козинцев В. И. Лидарный метод измерения толщины нефтяных пленок нефтепродуктов на взволнованной морской поверхности // Вестник МГТУ. Серия “Приборостроение”. — 2003 — № 1. — С. 62–69.
5. Лазерный метод измерения толщины пленок нефти на взволнованной морской поверхности, основанный на определении разности набега фаз в пленке для длин волн зондирования / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.А. Городничев и др. // Оптика атмосферы и океана. — 2007. — Т. 20. № 10. — С. 932–935.

6. Григорьев П. В., Ломоносов А. М., Солнцев М. В. Исследование статистических свойств отраженного сигнала при лазерном зондировании морской поверхности // Изв. АН СССР. Сер. “Физическая”. – 1987. – Т.51. № 2. – С. 210–214.
7. Д и с т а н ц и о н н ы й лазерный метод измерения толщины пленок нефтепродуктов на водной поверхности, основанный на определении коэффициента пропускания пленки нефти / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.А. Городничев и др. // Вестник МГТУ. Серия “Приборостроение”. – 2006 – № 2. – С. 56–64.
8. Г у р е в и ч И. Я., Ш и ф р и н К.С. Отражение видимого и ИК-излучения нефтяными пленками на море// Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Новосибирск: Наука, 1979. – С. 166–176.

Статья поступила в редакцию 26.10.2007

Михаил Леонидович Белов родился в 1950 г., окончил в 1973 г. Московский энергетический институт. Д-р. техн. наук, вед. науч. сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной локации и атмосферной оптики.

M.L.Belov (b.1950), graduated from Moscow Energy Institute in 1973. D. Sc. (Eng), head researcher of “Radioelectronics and Laser Technology” Research Institute of Moscow State Technical University n.a. Bauman. Author of more than 200 publications in the field of laser location and optic of atmosphere.

Валентин Иванович Козинцев родился в 1945 г., окончил в 1969 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р. техн. наук, зам. директора НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной техники.

V.I. Kozintsev (b.1945), graduated from Moscow Higher Technical School n.a. Bauman in 1969. D. Sc. (Eng), Deputy director of “Radioelectronics and Laser Technology” Research Institute of Moscow State Technical University n.a. Bauman. Author of more than 200 publications in the field of laser technology.

Виктор Александрович Городничев родился в 1952 г., окончил в 1976 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. техн. наук, начальник отдела НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной техники.

V.A.Gorodnichev (b.1952), graduated from Moscow State University n.a. Lomonosov in 1976. Ph. D. (Eng), head of department of “Radioelectronics and Laser Technology” Research Institute of Moscow State Technical University n.a. Bauman. Author of more than 200 publications in the field of laser technology.

Юрий Викторович Федотов родился в 1974 г., окончил в 1998 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области лазерной техники.

Yu. V. Fedotov (b.1974), graduated from Moscow Higher Technical University n.a. Bauman in 1998. Ph. D. (Eng), researcher of “Radioelectronics and Laser Technology” Research Institute of Moscow State Technical University n.a. Bauman. Author of more than 40 publications in the field of laser technology.