



ARTÍCULO

Influencia de una película de hidrocarburo en el régimen térmico en el área de un derrame

Oil film influence on the thermodynamic regime of the spill area

Fecha recepción: 2007-09-13 / Fecha aceptación: 2007-09-28

Serguei Lonin, slonin@costa.net.co

Grupo de Investigación en Oceanología, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla"
Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas CIOH, Isla Manzanillo, Cartagena de Indias, D. T. y C.

Resumen

Se estudia la influencia de los hidrocarburos en la superficie del mar en el régimen térmico y la dinámica del agua. Se supone que una película afecta el régimen de la capa superficial mediante los siguientes factores: aumento del albedo, atenuación del oleaje, disminución o cesación de la evaporación del agua y acumulación de la radiación solar de onda corta en la capa superficial. Estos mecanismos se estudian en los experimentos numéricos con ayuda de un modelo 1D de la capa superficial del océano y se presentan resultados para las condiciones de calma y vientos moderados.

Palabras claves: Película de hidrocarburos, régimen termodinámico, derrames.

Abstract

The oil surface slick influence on the thermal and current regimes is being studied. It is supposed that the slick affects the upper layer regime by the following factors: albedo increasing, wave damping, decreasing or cessation of the water evaporation, accumulation of the short-wave solar radiation into the slick layer. These mechanisms were studied on the numerical experiments with the help of an 1-D model for the upper ocean layer. Results for the calm and moderate wind conditions have been presented.

Key words: Hydrocarbon slick, thermodynamic regime, oil spills.

Introducción

En [1] Pielke escribe sobre una posible influencia de los derrames de hidrocarburos en los cambios de la circulación de las brisas. En el mismo artículo se anota que, en general, es importante el factor de viento en las aguas costeras para la formación de la circulación del agua. Si esto es cierto, entonces, el éxito de la predicción

del desplazamiento de las manchas de hidrocarburos luego de un derrame depende de algunas relaciones fundamentales en el sistema “hidrocarburo-medio ambiente”, las cuales deben ser consideradas.

En el artículo [1] se hace referencia al trabajo [2], en el cual se presenta un inventario de posibles efectos físicos de los derrames en la superficie del mar. Entre ellos se mencionan el retardo de evaporación del agua desde las gotas en el aire, reducción de la evaporación desde la superficie del agua, atenuación del oleaje y, también, el aumento del calor en vecindad de la superficie.

Hovis y Knoll [3] dicen que los cambios de temperatura en la película pueden alcanzar unos 20°C o más en comparación con las aguas alrededor de la mancha. Es imposible no tomar en consideración esta circunstancia cuando se discuten las características del balance superficial de calor y las posibles alteraciones de los parámetros hidrodinámicos. Todos los factores mencionados arriba pueden afectar la propia dinámica de la mancha y deben emplearse en los respectivos modelos. En [4] se formuló un modelo de derrames con los factores térmicos y los resultados de las simulaciones demostraron significativas variaciones diarias (más de 10°C) de la temperatura de la mancha, pero no se presentó ninguna comparación de estas variaciones con la superficie del agua pura.

En el presente trabajo se hace un intento de considerar prácticamente todos los factores importantes que forman el régimen térmico de la mancha para estimar la necesidad de simular dicho fenómeno en los modelos. Se realiza también una comparación de algunos resultados con las mediciones en laboratorio.

Mecanismos físicos

Vamos a considerar la presencia de manchas de hidrocarburos en la superficie del mar desde el punto de vista de los siguientes factores físicos, los cuales pueden alterar el régimen termodinámico:

- Aumento del albedo de la superficie;
- Disminución de altura de las olas y la rugosidad superficial;
- Disminución (para las películas delgadas) y

cesación (para las gruesas) de la evaporación de agua desde la superficie del mar;

- Débil penetración de la radiación de onda corta y su acumulación (absorción) dentro de la capa del hidrocarburo.

De los factores mencionados, sólo el aumento del albedo conduce al efecto de mayor enfriamiento de la superficie, mientras que los demás factores favorecen su calentamiento.

Shekhter & Murashova en [5] reportan que el coeficiente eficiente de reflexión (r_{12}) depende débilmente del espesor y tipo del hidrocarburo, debido a que la reflexión desde la superficie de éste da mayor contribución en r_{12} , mientras que la reflexión múltiple entre el hidrocarburo y el agua no tiene más del 10% de r_{12} . El coeficiente r_{12} disminuye lentamente con el espesor de la mancha (para los espesores entre 0.1 y 100 μm) y es aproximadamente igual a 0.4%. Su dependencia del ángulo solar tampoco es significativa (2-3%, aprox.) y, por lo tanto, los cambios del albedo de la superficie en presencia de hidrocarburos pueden considerarse independientes de la hora del día.

Al contrario, la penetración eficiente de la radiación solar depende fuertemente del espesor y tipo de hidrocarburo en la mancha. Para los espesores mayores de 100 μm , la radiación penetra más de un 20% y esta porción rápidamente tiende a cero con el aumento del espesor de la mancha. Se requiere mencionar que todos los resultados citados fueron obtenidos bajo condiciones de cielo despejado [5].

En [6], para las películas de espesor de hasta 100 μm se estableció que los productos livianos tienen una transparencia alta en la parte visual del espectro solar, mientras que los hidrocarburos pesados tienen la misma propiedad sólo para los de 10 a 20 μm . En general, las manchas delgadas (<5 μm) disminuyen la penetración solar, por la reflexión en la frontera aire-hidrocarburo en una tasa del 4%. La reflexión en la frontera entre el aire y el agua pura se define igual al 2% [7]. En el último artículo se menciona también que las manchas afectan el flujo de onda corta y la composición espectral de la radiación solar penetrada y que las propiedades de radiación penetrada cambian notoriamente bajo vientos con velocidades mayores de 6 a 8 m/s (cuando la mancha se involucra en la columna del agua).

Las manchas afectan específicamente su intervalo de ondas más cortas, con una disminución brusca de la radiación foto-sintéticamente activa, en particular. Para las manchas cuyo espesor es mayor de 100 μm , dicha afectación también tiene influencia en el intervalo infrarrojo. Sin embargo, la radiación infrarroja se absorbe normalmente en la capa superficial, en los primeros 1-2 metros, al igual que sin presencia de manchas, así que el último efecto no tendrá que alterar significativamente el régimen termodinámico.

En el trabajo [8] se efectuó la investigación sobre la evaporación del agua bajo las películas mono-moleculares en condiciones de laboratorio. Se encontró que la evaporación y el contenido del calor en la capa superficial se alteran entre 15 y 5% y entre 1.12 y 1.4 veces, respectivamente; en comparación con el agua pura durante ocho horas del experimento la temperatura superficial y la presión del vapor saturado aumentan hasta 2.5°C y 4 mb, respectivamente.

Considerando los efectos hidrodinámicos en presencia de manchas de crudo, se puede mencionar el trabajo [9], en el cual se observó una ligera atenuación del oleaje debido a la desaparición de olas capilares y disminución del coeficiente de resistencia de la superficie entre 25 y 33% (para los vientos moderados). También se notó que la atenuación de las olas capilares lleva a la disminución de la velocidad de fricción a no más de un 10%.

Sintetizando la información de los trabajos citados, vamos a asumir que el albedo (A') de la mancha aumenta en 2.5% en comparación con el albedo (A) del agua pura, es decir, $A'=A+0.025$. Luego, suponemos que para las manchas gruesas, el régimen hidrodinámico de la superficie cambia del régimen rugoso al suave. En caso extremo, se puede asumir que el parámetro de rugosidad z_0 de la superficie cubierta con la mancha, se define para las superficies hidrodinámicamente suaves con la siguiente fórmula:

$$z_0 = c'v/u_* \quad (1)$$

donde v es la viscosidad molecular del agua; u_* es la velocidad de fricción y c' es una constante universal ($c' = 1/9$).

Vamos a suponer que la evaporación de agua se reduce en un 10% para las películas mono-moleculares, mientras que para las películas gruesas no se presenta. También asumimos, que en el último caso la radiación solar se absorbe completamente en la película.

Dada la necesidad de sobreestimar el efecto de las manchas en el régimen térmico para concluir sobre la importancia del fenómeno en los modelos se evalúa el carácter extremo de las condiciones mencionadas anteriormente. Los experimentos numéricos, presentados abajo, tienen por objeto demostrar la contribución de cada fenómeno en el proceso y poder comparar los resultados entre sí. En la tabla 1 se presentan las condiciones de los seis experimentos numéricos. El primer experimento corresponde al agua pura (sin el derrame), mientras que en el último se involucran todos los factores físicos.

Tabla 1. Condiciones de los experimentos numéricos.

Experimento	Albedo	Rugosidad	Flujo latente de calor LE	Radiación solar absorbida $(1 - m)F_i$
1	Albedo del agua (A)	Por Charnok***	LE_{norm} *	$m = 0.4$
2	$A' = A + 0.025$	Por Charnok	LE_{norm}	$m = 0.4$
3	A	Fórmula (1)	LE_{norm}	$m = 0.4$
4	A	Por Charnok	a) $LE = 0$ b) $LE = 0.9LE_{norm}$	$m = 0.4$
5	A	Por Charnok	LE_{norm}	$m = 0$
6	$A' = A + 0.025$	Fórmula (1)	$LE = 0$	$m = 0$

* - LE_{norm} es la evaporación "normal" del agua;

** - m es la fracción de la radiación penetrada; F_i es la radiación solar incidente;

*** - según Charnok, $z_0 = 7.8 \cdot 10^{-3} u_*^2/g$, donde g es la gravedad.

Metodología

El interés del presente trabajo son los mecanismos de intercambio de calor e impulso entre la atmósfera y el océano en presencia de películas de hidrocarburo. Por lo anterior, se empleó un modelo 1-D en la vertical (ver [10, 11]). Las ecuaciones básicas son:

$$\partial u/\partial t - fv = \partial/\partial z [(K_z+v)\partial u/\partial z], \quad (2)$$

$$\partial v/\partial t + fu = \partial/\partial z [(K_z+v)\partial v/\partial z], \quad (3)$$

$$C_{pw}\rho_w \partial T/\partial t = C_{pw}\rho_w \partial/\partial z [(\alpha_T K_z + \chi)\partial T/\partial z] - \partial Q_R/\partial z, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \partial b/\partial t &= K_z [(\partial u/\partial z)^2 + (\partial v/\partial z)^2] + \\ \partial/\partial z (\alpha_b K_z \partial b/\partial z) &+ g\alpha_T \alpha K_z \partial T/\partial z - \varepsilon, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \partial \varepsilon/\partial t &= C_{1\varepsilon} \varepsilon/b K_z [(\partial u/\partial z)^2 + (\partial v/\partial z)^2] + \\ \partial/\partial z (K_z/\sigma_\varepsilon \partial \varepsilon/\partial z) &+ C_{3\varepsilon} \varepsilon/b g\alpha_T \alpha K_z \partial T/\partial z - C_{2\varepsilon} \varepsilon^2/b, \end{aligned} \quad (6)$$

$$K_z = C_\mu b^2/\varepsilon, \quad (7)$$

donde u y v son componentes horizontales de la velocidad de corrientes en las direcciones x e y ; z es la coordenada vertical; T es temperatura del agua; f es el parámetro de Coriolis; t es tiempo; ρ_w , C_{pw} son densidad y capacidad específica de calor para el agua, respectivamente; Q_R es la radiación solar de onda corta, la parte que penetra la superficie del mar; b es la energía cinética de turbulencia; ε es la tasa de su disipación; α es la constante de expansión térmica del agua; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$, σ_ε , C_μ , α_b , α_ε son constantes [12] iguales a 1.38, 1.40, 1.40, 1.0, 0.08, 1.0, 1.0, respectivamente; α_T y χ son el número inverso de Prandtl (turbulento) y la conductividad molecular de calor, respectivamente; K_z es el coeficiente de turbulencia en la vertical.

Las condiciones de contorno para (2)-(7) en la superficie del mar ($z=0$) son:

$$\begin{aligned} (K_z+v)\partial u/\partial z &= -\tau_x/\rho_w; (K_z+v)\partial v/\partial z = -\tau_y/\rho_w; \\ (\alpha_T K_z + \chi)\partial T/\partial z &= -Q_T; \alpha_b K_z \partial b/\partial z = 0; \\ \alpha_\varepsilon K_z \partial \varepsilon/\partial z &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

y debajo de la termoclina ($z=H$):

$$u = v = 0; b = 0; \varepsilon = 0; T = \text{Const.} \quad (9)$$

τ_x , τ_y en (8) son componentes tangenciales del estrés de viento en la superficie del mar; Q_T es el flujo resultante de calor en la misma superficie.

Vamos a suponer que un 40% de la radiación solar

incidente F_i penetra a través de la superficie del agua, es decir,

$$Q_R = 0.4 F_i \exp(-\beta_Q z), \quad (10)$$

donde β_Q es el coeficiente de extinción de luz ($\beta_Q = a/z_d$; $a \approx 2$; z_d es la profundidad en la cual la radiación superficial alcanza sólo un 10%). En (10) F_i se determina por la radiación F_{i0} que llega a la superficie y el albedo A' , así: $F_i = F_{i0}(1-A')$.

Entonces se presenta el balance superficial de calor Q_T , como

$$Q_T = 0.6 F_i + F_{\text{eff}} + H_T + LE_T, \quad (11)$$

donde F_{eff} es la radiación eficiente de onda larga; H_T , LE_T son flujos turbulentos de calor sensible y latente, respectivamente.

Los últimos flujos y también los componentes del estrés de viento se calculan a través de las fórmulas "bulk" [12], teniendo en cuenta la estratificación de la capa próxima de la atmósfera y la rugosidad de la superficie. El parámetro de rugosidad se define por la fórmula (1), cuando es el caso, o por la fórmula de Charnok ($z_0 \sim u_*^2/g$) si la superficie del mar es hidrodinámicamente rugosa.

Condiciones del experimento

Los datos utilizados provienen de la estación meteorológica de las Islas del Rosario, permitiendo tener en cuenta las condiciones meteorológicas marinas con poca influencia del continente. La posición geográfica de la estación es $\varphi = 10^\circ 10'N$; $\lambda = 75^\circ 47'W$. Los datos de la nubosidad nula y el comportamiento diario *cuasi*-periódico de los parámetros meteorológicos corresponden al día 26 de 1995.

La figura 1 indica el comportamiento diario de la temperatura y humedad del aire. Los cálculos fueron realizados bajo condiciones de pequeñas variaciones diarias del viento entre 2 y 5 m/s de velocidad.

En este caso la frontera inferior del dominio se fijó en $H = 50$ m, lo que seguramente es mayor que la profundidad real de la capa de mezcla. Teniendo en cuenta que las condiciones iniciales corresponden al estado de reposo para las corrientes ($u = v = 0$ para $t = 0$), el sistema arrancó de este estado y el cálculo duro 4 días hasta alcanzar el régimen *cuasi*-estacionario. La figura 2 ilustra el comportamiento de los parámetros del modelo. Estas condiciones corresponden al caso del agua pura con la superficie del mar hidrodinámicamente rugosa.

Luego de estos 4 días, en el momento 00:00 a.m. (hora local) para estimar la influencia de la mancha durante las próximas 24 horas se cambiaron las condiciones del experimento de acuerdo a la tabla 1.

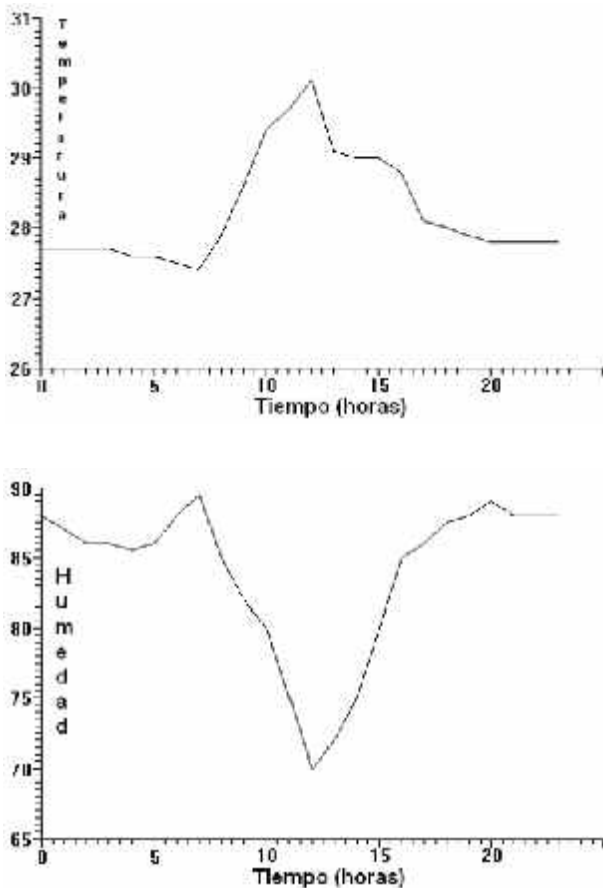


Figura 1. Variaciones diarias de la temperatura del aire (arriba, en °C) y la humedad relativa (abajo, en %) en las Islas del Rosario el día 26 de agosto de 1995.

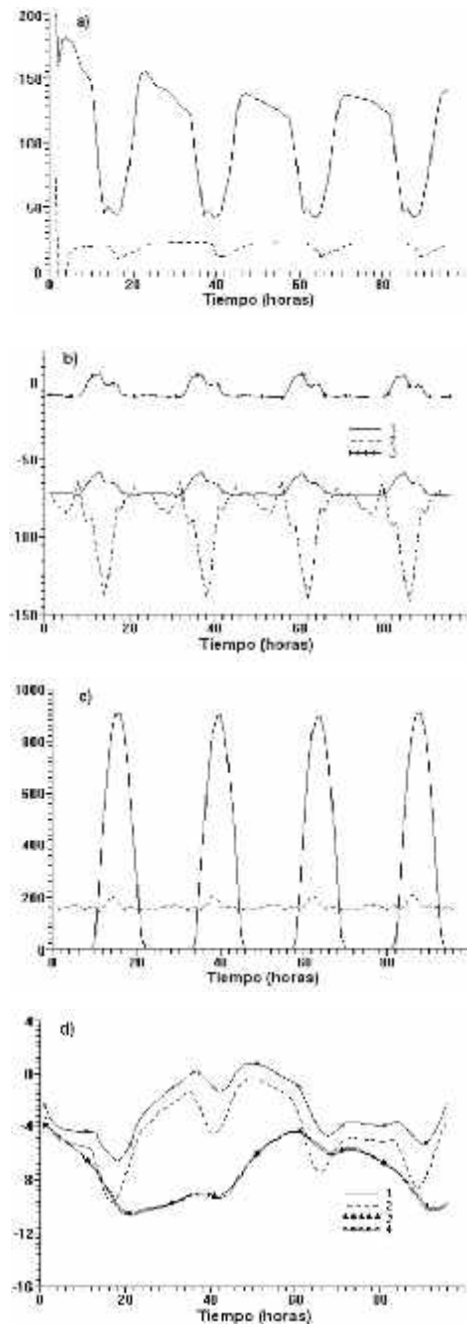


Figura 2. Comportamiento temporal de las variables del modelo para el agua pura en la etapa de arranque del modelo: a) coeficiente de turbulencia en la capa superior (línea continua, en cm^2/s) y la profundidad de la capa de mezcla (línea punteada, en m); b) flujo eficiente de onda larga (1), latente (2) y sensible (3) de calor (en W/m^2); c) radiación solar (línea continua) y el flujo total negativo en la superficie (línea punteada), valores en W/m^2 ; d) componentes U (1,3) y V (2,4) de velocidad de corrientes (en cm/s) en la superficie (1,2) y en la profundidad de 5 m (3,4).

Resultados

Los resultados se presentan en las figuras 3-6. La figura 3 indica las variaciones diarias de la temperatura del agua en la superficie del mar para los experimentos 1-6 de la tabla 1. Se observa que el aumento de albedo (2.5%, experimento 2) en comparación con la superficie sin la mancha (experimento 1) no reduce el calentamiento diario de la superficie. De la misma manera, no se observa un calentamiento notable de la superficie para el caso de las películas mono-moleculares (experimento 4b).

Los efectos de cesación de la evaporación del agua (experimento 4a), atenuación de las olas (experimento 3) y adsorción de la radiación solar (experimento 5) contribuyen de manera relativamente similar al régimen térmico, conduciendo a un calentamiento hasta 0.15°C. Se observan para el mecanismo de la absorción superficial de la radiación, las diferencias claras en la fase de culminación, máximo de temperatura del día (una hora antes). Esto tiene su explicación física: la radiación solar se redistribuye en una capa más delgada y se requiere menor período de tiempo (menor capacidad calorífica) para el calentamiento.

Finalmente, el experimento 6 muestra el efecto acoplado de todos los factores, indicando que la presencia de la mancha conduce a un incremento de la temperatura superficial no mayor de 0.5°C en comparación con el agua pura. Las variaciones más pronunciadas se observan en las corrientes (figura 4). Realmente, la transición del régimen rugoso al suave (experimento 3) está causando la disminución de la velocidad dentro de una capa superior en los primeros 5 metros hasta 1.2-1.4 cm/s para las magnitudes de corrientes de 10-11 cm/s.

La cesación de la evaporación del agua y adsorción de la radiación aumentan las corrientes superficiales en más del 10 %, mientras que el resultado integral, para toda la columna del agua de 5 m, es la disminución de velocidad en un 5-6 %. Esta observación puede explicarse de la siguiente manera: debido al régimen

hidrodinámicamente suave de la superficie del agua con la mancha, el espesor de la capa de mezcla (figura 5) disminuye de 10 a 7-8 metros, la turbulencia en la capa superior (figura 6) se debilita el doble y se presenta la transmisión del impulso de viento en una columna más delgada. Por lo anterior, las corrientes sub-superficiales se debilitan. Debido a la disminución de la transmisión de calor, por la misma razón, y por el calentamiento de la superficie, las fuerzas de boyancia crean una capa superficial delgada aislada, en la cual la energía del viento se concentra. El mismo fenómeno explica el comportamiento diario de las condiciones sin los hidrocarburos, cuando durante el día la superficie se calienta a 1°C (figura 2), las corrientes superficiales se incrementan el doble (figura 4) y el espesor de la capa de mezcla disminuye de 22 a 8-9 metros (el efecto también es conocido como “summer jets”).

Por lo mostrado arriba, el efecto de disminución de turbulencia por las fuerzas de boyancia en el caso de las manchas de hidrocarburo en el mar y las alteraciones de las propiedades hidrodinámicas, puede tener importancia desde el punto de vista de los efectos dinámicos. Sin embargo, para el caso del océano real bajo las condiciones normales el aumento de temperatura no es significativo.

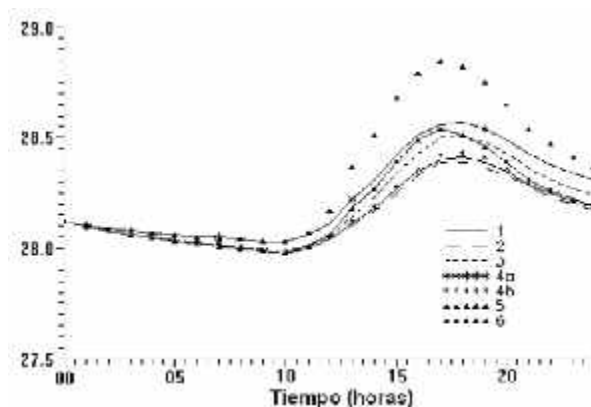


Figura 3. Variaciones temporales de la temperatura (en °C) superficial del agua en presencia de la mancha. Los números de experimentos corresponden a lo indicado en la tabla 1.

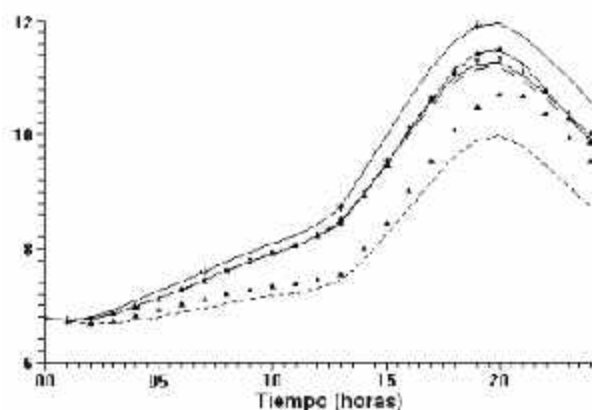
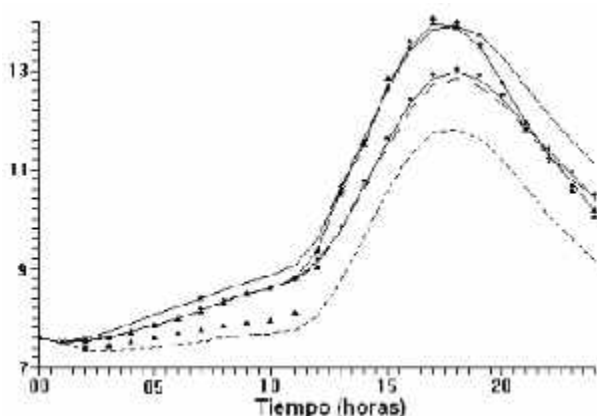


Figura 4. Variaciones temporales de velocidad de corrientes (en cm/s) en la superficie del mar (arriba) y a 5 m de profundidad (abajo) en presencia de la mancha (ver figura 3 para los detalles de cada curva).

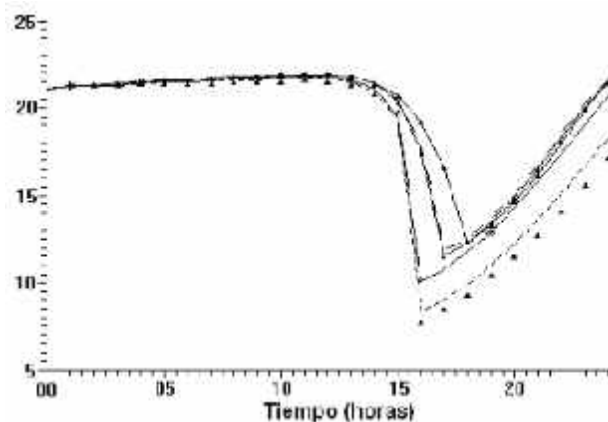


Figura 5. Comportamiento temporal del espesor (en m) de la capa de mezcla en presencia de la mancha (ver figura 3 para los detalles de cada curva).

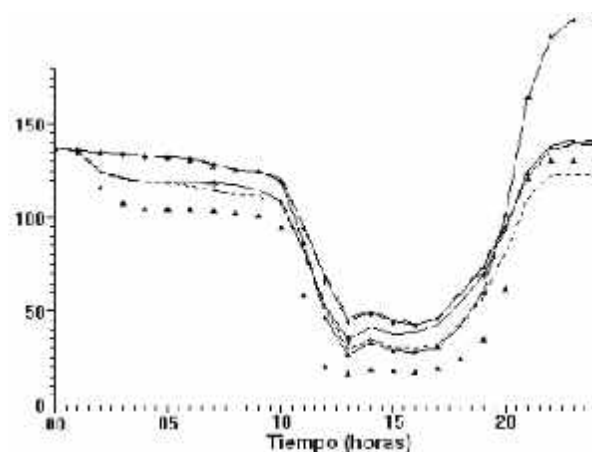


Figura 6. Comportamiento temporal del coeficiente de turbulencia (en cm^2/s) en presencia de la mancha (ver figura 3 para los detalles de cada curva).

Discusión y conclusiones

Los experimentos ejecutados para las condiciones oceánicas medias mostraron que la temperatura de la mancha de hidrocarburos no se incrementa más de 0.5°C , el máximo diario de temperatura se presenta una hora antes en comparación con la superficie no contaminada y en el caso de las películas monomoleculares no se observa prácticamente ninguna alteración.

Debe señalarse en adición a lo descrito anteriormente, que la mancha en movimiento “siente” el efecto de intercambio de calor entre el agua y el aire en las aguas adyacentes, por lo tanto, los resultados obtenidos pueden ser sobreestimados. En otras palabras, era imposible tener en consideración los efectos de interacción tres-dimensional en una aproximación de 1-D.

El efecto térmico es muy pequeño y es comparable con el error de detección de la temperatura. Por ejemplo, el error relativo $\delta T/T$ en la dependencia lineal entre la evaporación y la temperatura no excede 2.5%. Las alteraciones de las propiedades del crudo por el calentamiento también son despreciables.

Sin embargo, para el caso de los derrames grandes, puede ser ventajoso tener en cuenta la influencia de las manchas en las corrientes. En este trabajo se demuestra que las corrientes se pueden acelerar en un

10%, mientras que las corrientes sub-superficiales disminuyen su intensidad debajo de la mancha. Pero si se piensa que nuestro conocimiento sobre los mecanismos de movimiento de la mancha se basa en la relación empírica $V_{oil} = 0.03W_a + V_s$ [13], donde V_{oil} , W_a y V_s son vectores de velocidad de la mancha, del viento y de la superficie del agua, respectivamente, entonces, un error de 10% en el cálculo de V_s parece que no afecta mucho la exactitud de cálculo final. La causa de esta circunstancia es la inexactitud de la fórmula para V_{oil} y los errores de estimación de los vientos y corrientes. El coeficiente empírico (0.03) en la fórmula anterior varía más del 10% por las causas escritas en [13]. Es posible que en un futuro próximo en los modelos más modernos estos errores se eliminen parcialmente.

El interrogante planteado en la introducción todavía está abierto. Diversas estimaciones de autores distintos concluyen un rol más importante de las manchas desde el punto de vista del régimen térmico. Para ampliar la respuesta, los experimentos del laboratorio fueron ejecutados. Los experimentos fueron realizados en el CIOH en dos acuarios de vidrio sin tapa, expuestos al aire libre. La temperatura superficial del agua en un acuario con el agua limpia y del crudo Cusiana en el otro fue medida. Los experimentos, entonces, correspondieron a las condiciones naturales tropicales con el cielo despejado. Sin embargo, la velocidad del viento en la superficie de los acuarios fue limitada, debido a los detalles constructivos (las paredes de vidrio con respecto a la posición de la superficie del agua formaban las zonas de sombra para el viento). Bajo estas restricciones, las condiciones del experimento fueron casi semejantes a las de calma. Para estas condiciones, fue calculado el comportamiento diario de la temperatura de la superficie, empleando el mismo modelo y las condiciones meteorológicas del momento. Los resultados del modelo y del laboratorio se muestran en la figura 7. La figura muestra una posibilidad real de aumento de temperatura entre 15 y 20°C o más, bajo las condiciones de calma. El modelo satisfactoriamente representa el proceso. Sin embargo, la ausencia total de los vientos en la naturaleza es una situación bien rara.

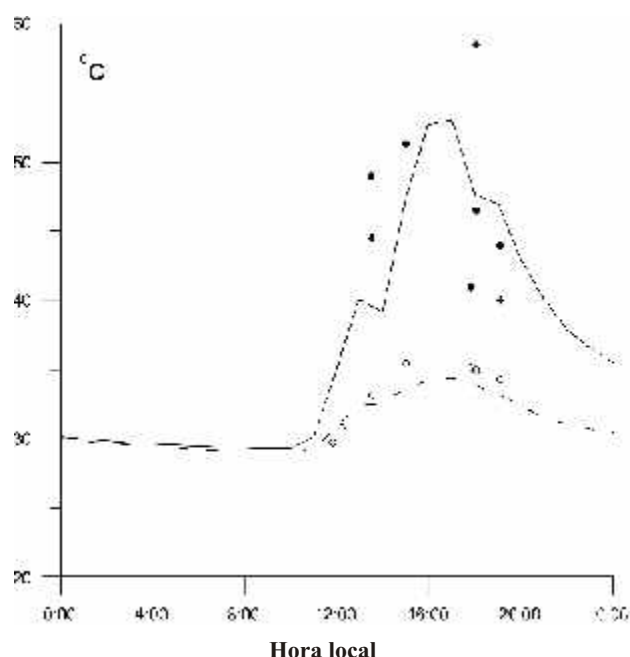


Figura 7. Comportamiento temporal de la temperatura del agua con (línea continua) y sin (línea punteada) la mancha de hidrocarburos bajo las condiciones de calma en laboratorio. Los puntos corresponden a los datos de observaciones en los acuarios: el agua pura (círculos) y la superficie de hidrocarburo (puntos y cruces).

Agradecimientos

El trabajo fue financiado por DIMAR y COLCIENCIAS en el proyecto 0140-09-347-95. El autor agradece al Dr. Alexander Kazakov por la discusión del tema, al Dr. Anatoliy Lezhenin por el suministro del código del modelo numérico y al M.Sc. Carlos Parra por sugerencias al texto.

Referencias bibliográficas

- [1] Pielke RA. (1981). An Overview of our Current Understanding of the Physical Interactions between the Sea- and Land - Breeze and the Coastal Waters. *Ocean Manag.* 6, 87 - 100.
- [2] Morrison BJ. (1979). The impact of pollution on air/sea interactions. (Paper prepared as an independent study project, Dep. Environ. Sci., Univ. of Virginia).

[3] Hovis, W.A. & Knoll, J.S. (1979). Optical measurements of crude oil samples under simulated conditions. NOAA Tech. Mem. NESS 105.

[4] Rasmussen, D. (1985). Oil spill modeling - a tool for cleanup operations. Oil Spill Conf. Modeling and Mapping: Cleanup Operations, 243 - 249.

[5] Shekhter FN & Murashova AV. (1982). Reflection and penetration of the solar radiation by the oil films at the water. Proc. GGO, 468, 28 - 37. (in Russian).

[6] Shekhter FN, Sheveleva TYu, Leus NB & Kropotkin M. (1980). Estimation of surface slick influence of the oil and oil products on the light and thermal regimes of the water. Proc. GGO, 444, 9 - 16. (in Russian).

[7] Shekhter FN, Kropotkin MA & Sheveleva TYu. (1979). Influence of pollutant surface films on the light and thermal regime of the water. Proc. GGO, 423, 11 - 21. (in Russian).

[8] Lobodin MA, Masakitov SS & Yaroshevich EF. (1985). About influence of the monomolecular films of organic pollutants on the thermal regime of the upper water layer. Water Resources, 4, 12 - 18. (in Russian).

[9] Biutner EK & Zakharova OK. (1979). Influence of the oil film on the surface resistance for moderate wind condition. Proc. GGO, 423, 3 - 6. (in Russian).

[10] Marchuk GI & Kagan BA. (1991). Dynamics of Ocean Tides. 2-nd edition. Leningrad, Gidrometeoizdat. (in Russian).

[11] Sukhorukov VA, Dmitriev NV & Likhachov SM. (1986). Simulation of the Ocean Mixed Layer. Preprint 675, Computer Centre of the Academy of Sciences of the USSR, Novosibirsk, Russia. (in Russian).

[12] Monin AS & Yaglom AM. (1971). Statistical Fluid Mechanics. Vol. I, Cambridge, MIT Press.

[13] Lonin S y Parra Llanos C. (2005). Predicción del comportamiento de las manchas de hidrocarburo derramado en el mar. Boletín Científico CIOH 2005; (23): 6-21.