

MODELAMIENTO DE LA PROPAGACIÓN DE LOS FRENTES DE CONTAMINACIÓN GENERADOS POR EL TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES POR POLIDUCTO

MODELLING OF THE POLLUTANT FRONTS GENERATED BY PIPELINE FUEL TRANSPORTATION

ALEXANDER CONCHA DEMOYA

Drilling and Measurement LAM/PCE Schlumberger. alexander_concha@hotmail.com

HUGO QUIROGA CRUZ

ECOPETROL S.A. Departamento de Producción Huila-Tolima. Hugo.QuirogaC@ecopetrol.com

PEDRO NEL BENJUMEA HERNÁNDEZ

Grupo Combustibles Alternativos. Instituto de Energía. Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia. Medellín. pbenjume@una.edu.co

Recibido para revisar 18 de Mayo de 2006, aceptado 26 de Septiembre de 2006, versión final 26 de Octubre de 2006

RESUMEN: Se propone un modelo matemático para predecir el crecimiento de la zona de mezcla o frente de contaminación que se genera entre combustibles derivados del petróleo como consecuencia de su transporte secuencial por poliductos. Dicho modelo se construye a partir de conceptos básicos de fenómenos de transporte, introduciendo un coeficiente efectivo de transferencia de masa que tiene en cuenta el mecanismo de difusión pura y su aporte a la convección. El modelo, una vez ajustado con datos de campo, se aplica para predecir el volumen del frente de contaminación y para analizar el efecto de variables como la longitud y el diámetro del poliducto, y la tasa de flujo sobre el crecimiento del volumen del frente.

PALABRAS CLAVE: Poliducto, productos del petróleo, transporte, transferencia de masa.

ABSTRACT: A mathematical model for predicting the growth of the blending zone or pollutant front, developed between petroleum derived fuels as a consequence of their sequential transport into product pipelines, is proposed. This model is constructed from transport phenomena basic concepts by introducing a mass transfer effective coefficient taking into account the pure diffusion mechanism and its contribution to convection. The model, once adjusted using field data, is applied for predicting the pollutant front volume and for analyzing the effect of variables such as the product pipeline length and diameter, and the flow rate on the growth of the front volume.

KEYWORDS: pipeline, petroleum products, transport, mass transfer.

1. INTRODUCCION

El suministro de combustibles para motor derivados del petróleo, en las cantidades y especificaciones de calidad adecuadas, es una actividad estratégica para la economía de un país. En Colombia, esta labor es llevada a

cabo por la Vicepresidencia de Transporte de la empresa colombiana de petróleos (ECOPETROL) a través del sistema nacional de poliductos. Dicho sistema consta de una extensa red de tuberías que transportan los combustibles desde las refinerías hasta los centros de distribución y consumo masivo.

Dado que no tendría sentido económico tender tuberías paralelas dedicadas cada una a un solo combustible, la solución práctica ha sido transportar en forma secuencial los diferentes productos por baches o lotes a través de un mismo conducto. Los combustibles más comúnmente transportados por los poliductos colombianos son: gasolina corriente y extra, ACPM o diesel, queroseno, turbocombustible, y el avigas o gasolina de aviación. En una secuencia de bombeo típica (ver figura 1) los productos se organizan de acuerdo con su densidad y entre ellos se insertan los denominados lotes "buffer" o cuñas.



Figura 1. Secuencia de bombeo típica [1]

Figure 1. Typical pumping sequence [1]

La opción tecnológica de transporte por lotes, a pesar de ser la más rentable para el caso de los combustibles derivados del petróleo, presenta inconvenientes debido al efecto de mezclado que se da entre productos en la tubería, lo cual conlleva finalmente a generar un volumen de fluido o frente de contaminación que por sus características no puede ser considerado dentro de las especificaciones de los productos que lo han formado. Suprimir en su totalidad dichos frentes de contaminación es imposible puesto que son inherentes a la tecnología del sistema. Una ayuda muy importante sería poder predecir, en cualquier tramo del poliducto, la longitud de la zona de mezcla (posición de su cabeza y cola) y su correspondiente volumen a un tiempo dado. De este modo sería posible mejorar la eficiencia de la operación de bombeo en el sistema de poliductos. En la mayoría de los casos la contaminación se debe retirar de la línea antes de la entrega de productos a los distribuidores mayoristas, ya sea, para mezclarla a baja

concentración en un lote donde sea aceptable o para reciclarla o llevarla a la refinería y procesarla nuevamente [2].

2. DESARROLLO DEL MODELO

Con el modelamiento de la propagación de un frente de contaminación se busca cuantificar la longitud de la zona de mezcla y el volumen correspondiente en función del tiempo y la posición para un tramo dado de poliducto.

Ecuación de transporte de masa

El sistema a analizar comprende dos fluidos completamente miscibles de diferente composición química, denotados como A y B, desplazándose en una tubería de diámetro fijo. El fluido A es el desplazante y el B el desplazado. La transferencia de masa en tal sistema tiende a ser determinada por el mecanismo convectivo en el núcleo de flujo (eje de la tubería) y por el mecanismo molecular cerca a las paredes. Dadas las altas velocidades de flujo que normalmente se alcanzan en un poliducto, se puede asumir que el aporte radial al transporte de masa es insignificante [3]. Teniendo en cuenta que no existen términos de fuentes ni sumideros, la ecuación para el transporte de masa en el sistema considerado (frente de contaminación) esta dada por la siguiente expresión:

$$\rho \frac{\partial w_A}{\partial t} = - \frac{\partial n_{AT}}{\partial z} \quad (1)$$

Donde: ρ es la densidad de la mezcla, w_A la fracción másica del fluido desplazante, n_{AT} es el "flux" total de masa de la especie A, t es el tiempo y z la dirección de flujo. El término n_{AT} se puede descomponer como la suma de tres componentes [4]:

$$n_{AT} = n_{AD} + n_{ADC} + n_{AC} \quad (2)$$

Donde: n_{AD} es el "flux" de masa debido a la difusión molecular pura, n_{AC} es el "flux" de masa debido al movimiento total de la mezcla "bulk" y n_{ADC} es el "flux" de masa debido al aporte difusivo a la convección. Considerando un coeficiente efectivo de transferencia de masa, D_{EF} , que represente la intensidad de formación

de mezcla a lo largo del eje de la tubería, debido a la suma de los efectos difusivos, se tiene por ley de Fick:

$$n_{AD} + n_{ADC} = -D_{EF} \rho \frac{\partial w_A}{\partial z} \quad (3)$$

Expresando el término netamente convectivo en función de la velocidad en la dirección de flujo v_z , se tiene:

$$n_{AT} = -D_{EF} \rho \frac{\partial w_A}{\partial z} + \rho v_z w_A \quad (4)$$

Reemplazando las ecuaciones (3) y (4) en la ecuación (1) se tiene finalmente la ecuación de transporte de masa, ETM, en función de la concentración másica del fluido desplazante:

$$\frac{\partial w_A}{\partial t} + v_z \frac{\partial w_A}{\partial z} - D_{EF} \frac{\partial^2 w_A}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

En el desarrollo de la ETM implícitamente se está asumiendo que los fluidos son incompresibles y newtonianos. Adicionalmente, no se está teniendo en cuenta la posible dilatación térmica que pueden experimentar los fluidos en su trayecto por el poliducto. Con las suposiciones consideradas, la ETM conserva la

misma estructura de la ecuación 5 cuando se expresa en función de la fracción volumétrica del fluido desplazante, X_A .

$$\frac{\partial X_A}{\partial t} + v_z \frac{\partial X_A}{\partial z} - D_{EF} \frac{\partial^2 X_A}{\partial z^2} = 0 \quad (6)$$

Condiciones iniciales y de frontera

Para el planteamiento de las condiciones iniciales y de frontera se deben tener en cuenta las posiciones de los extremos del frente de contaminación:

$z = z_f$: posición de la cabeza del frente de contaminación para un tiempo t

$z = z_c$: posición de la cola del frente de contaminación para un tiempo t

Tales posiciones se deben referenciar con respecto a un punto origen ($z = 0$), el cual puede estar ubicado al inicio del poliducto o a la entrada o salida de una estación de bombeo. La figura 2 muestra la forma en que se propaga el frente de contaminación en un tramo de poliducto de longitud L .

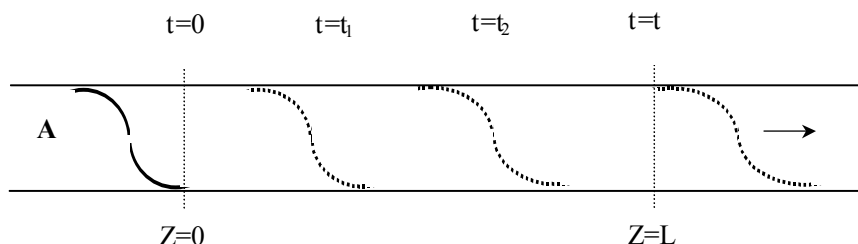


Figura 2. Movimiento de la zona de mezcla a lo largo de un tramo de tubería
Figure 2. Blending zone movement along a pipe section

De acuerdo con la figura 2, para cualquier tiempo t , hacia adelante del punto que indica la posición de la cabeza del frente de contaminación se tendrá producto B puro y hacia atrás, se tendrá mezcla. Para poder aplicar el modelo se debe asumir que la especie A es una mezcla de fluido desplazante, con una cantidad muy pequeña de fluido desplazado (un nivel de tolerancia dado), y a su vez la especie B es una mezcla de fluido desplazado con una cantidad mínima de fluido desplazante. Con base en las

anteriores consideraciones, las condiciones iniciales en función de la concentración volumétrica de la especie A vienen dadas por:

$$X_A(z, 0) = \begin{cases} X_{BO}, & \text{Si } z > 0 \\ X_A(z) & \text{Si } z < 0 \end{cases}$$

Donde X_{BO} es la concentración de la especie desplazada pura, la cual tiende a la unidad. Por su parte las condiciones de frontera se pueden

plantear con base en la posición de los extremos del frente, así:

$$\left. \frac{\partial X_A}{\partial z} \right)_{z=z_f, t} = 0 \quad \text{y}$$

$$-D_{EF} \left. \frac{\partial X_A}{\partial z} \right)_{z=z_c, t} = v_z (X_{AO} - X_A)$$

La segunda condición indica que el cambio en la concentración del fluido desplazante se debe completamente al fenómeno de transferencia de masa.

3. SOLUCION DEL MODELO

La ecuación diferencial parcial (6) se puede transformar en una ecuación diferencial ordinaria solucionable por los métodos analíticos convencionales [5]. Para ello se introduce una variable adimensional de concentración J , y una transformada o variable de similitud adimensional, Φ , definidas por las siguientes ecuaciones:

$$J(t) = \frac{X_A}{X_{AO}} \quad \text{y} \quad \Phi = \frac{z - v_z t}{\sqrt{4D_{EF} * t}}$$

Mediante la sustitución de variables indicada y una manipulación matemática adecuada se llega a la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial^2 J}{\partial \Phi^2} + 2\Phi \frac{\partial J}{\partial \Phi} = 0 \quad (7)$$

Con sus correspondientes condiciones de frontera:

$$z \rightarrow \infty, \quad \Phi \rightarrow \infty \quad J \rightarrow 0$$

$$z \rightarrow -\infty \quad \Phi \rightarrow -\infty \quad J \rightarrow 1$$

Las condiciones de frontera son de dominio no acotado, debido a que los cálculos se realizan generalmente para relaciones longitud/diámetro muy altas. La ecuación (7) es ampliamente conocida al igual que su solución [5-7]:

$$J = 1 - \text{erf}(\Phi) \quad \text{y}$$

$$\text{erf}(\Phi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\Phi e^{-\Phi^2} d\Phi$$

El modelo también se puede resolver en forma numérica, para lo cual se transforma la ecuación (7) en un sistema de dos ecuaciones ordinarias de primer orden:

$$y_1 = J, \quad y_2 = \frac{\partial J}{\partial \Phi}$$

$$\frac{\partial y_1(\Phi)}{\partial \Phi} = y_2(\Phi),$$

$$\frac{\partial y_2(\Phi)}{\partial \Phi} = -2\Phi y_2(\Phi)$$

Dicho sistema de ecuaciones se puede resolver utilizando el comando **bvp4c** de *Matlab*, el cual usa un método de colocación con dos valores de frontera [8]. Dado que el comando utilizado no permite introducir condiciones de frontera no acotadas, se deben seleccionar los valores máximos y mínimos de la variable Φ con más probabilidad de ocurrir en el poliducto al cual se aplique el modelo. Además de una definición adecuada de los valores de frontera, el comando **bvp4c** exige que se proponga una solución inicial al problema.

El modelo desarrollado permite analizar el comportamiento del perfil de concentración fijando el tiempo o la distancia. El perfil de concentraciones se considera simétrico, de tal modo que los puntos correspondientes a la cabeza y la cola del frente se identifican por una tolerancia preestablecida:

$$z = z_f \rightarrow J = 0.02$$

$$z = z_c \rightarrow J = 0.98$$

En el primer caso se obtienen los tiempos correspondientes para que los extremos del frente de contaminación pasen por un punto fijo. En el segundo caso se fija un tiempo, para el cual se quiere determinar a que distancias del punto de referencia se encuentran los extremos del frente de contaminación.

El volumen del frente de contaminación, V_{FC} , puede estimarse aplicando el primer caso para obtener los tiempos correspondientes a la cabeza y cola (t_F y t_C), y multiplicando su diferencia por el caudal promedio [1]:

$$V_{FC} = \pi \left(\frac{D^2}{4} \right) v_z (t_C - t_F) \quad (8)$$

Donde D es el diámetro del poliducto.

4. APLICACIONES DEL MODELO

El modelo desarrollado se implementó en un tramo del poliducto Sebastopol – Medellín, usando un combustible del ciclo de livianos (gasolina) y uno del ciclo de medianos (diesel), separados con cuñas de *virgin oil*, producto desarrollado por ECOPETROL que al mezclarse con los combustibles principales no afecta sus propiedades fundamentales (el punto final de ebullición de la gasolina y el punto de chispa del diesel) [2]. El modelo se aplicó a los frentes de contaminación generados en el tubo, cuya concentración varía desde producto puro en la cabeza hasta cuña pura en la cola del frente (en el caso gasolina - *virgin oil*), y desde cuña pura en la cabeza hasta producto puro en la cola del frente (en el caso *virgin oil* - diesel). En cada caso se tomó un lote de producto bombeado a condiciones normales de operación, registrando los valores de densidad, presión, temperatura y caudal, al paso por la estación Nueva Cisneros y por la Terminal de Medellín. Mediante el registro continuo de densidad se pudo determinar el cambio de producto y a la vez, de manera bastante aproximada, los volúmenes de mezcla de cada bache [9].

Ajuste del Modelo mediante datos de campo

Uno de los elementos que más introduce dificultades a la hora de aplicar el modelo a un caso práctico es el cálculo del coeficiente efectivo de transferencia de masa, D_{EF} . Tal parámetro debe dar cuenta de la turbulencia y del sistema de fluidos involucrado, que para el caso

de estudio, a pesar de ser un sistema compuesto por mezclas multicomponentes complejas, se tomó como una mezcla binaria. Dada la dificultad de una aproximación analítica, en la literatura se encuentran reportadas numerosas correlaciones empíricas para el cálculo del mencionado parámetro en función principalmente de la viscosidad cinemática (η), la velocidad media de flujo (v_z), el número de Reynolds (R_e) y las dimensiones del tramo de poliducto: diámetro (D) y longitud (L) [10-11]. En este estudio se utilizaron cuatro de esas correlaciones seleccionadas por el rango del R_e para el cual son aplicables. Para calcular dicho número adimensional se utilizaron los valores de viscosidad cinemática para las mezclas 50/50 medidas en laboratorio.

Partiendo de información de campo suministrada por ECOPETROL sobre la operación en un día típico del tramo Nueva Cisneros – Terminal Medellín del poliducto Sebastopol – Medellín, se obtuvieron los siguientes volúmenes de los frentes de contaminación: frente gasolina – *virgin oil* = 65 barriles y frente diesel - *virgin oil* = 11 barriles. En la tabla 1 se muestran los valores predichos por el modelo para el volumen del frente gasolina – *virgin oil* utilizando las diferentes correlaciones para el coeficiente efectivo de transferencia.

Aunque la correlación (D) da una buena aproximación para el cálculo del frente de contaminación gasolina – *virgin oil* (error relativo de 1.98%) se decidió seleccionar la correlación (E) pues con ella se obtiene la mejor aproximación para el volumen del frente diesel – *virgin oil*.

Análisis de variables

Una vez ajustado para el tramo del poliducto seleccionado, el modelo se puede utilizar para analizar la influencia de diferentes variables en el crecimiento del volumen de los frentes de contaminación. Las variables tenidas en cuenta fueron: caudal (Q en barriles por hora, BPH), longitud (L en metros, m) y diámetro de la tubería (D en pulgadas, pulg.). El análisis,

ilustrado en las figuras 3 y 4, se hizo fijando el valor de una de las variables mientras las otras dos varían en un rango adecuado. Como valores fijos se tomaron los valores característicos del

tramo de poliducto analizado: $Q = 1400$ BPH y $D = 12$ pulg.

Tabla 1. Volúmenes del frente de contaminación gasolina – *virgin oil* en función del coeficiente efectivo de transferencia de masa

Table 1. Volumes of the *gasoline – virgin oil* pollutant front as a function of the mass transfer effective coefficient

Correlación	D_{EF}	J	Φ	t (minutos)	V_{FC} (barriles)
(A) $D_{EF} = 18.7 * \eta * R_e$	4.548	0.980	0.017725	$t_c = 1023.42$	70.660
		0.020	1.645000	$t_f = 1020.31$	
(B) $D_{EF} = 9 * v_z * D / R_e^{0.16}$	21.318	0.980	0.017725	$t_c = 1023.38$	152.701
		0.020	1.645000	$t_f = 1016.66$	
(C) $D_{EF} = 17.4 * \eta * R_e^{2/3}$	6.051	0.980	0.017725	$t_c = 1023.41$	81.483
		0.020	1.645000	$t_f = 1019.83$	
(D) $D_{EF} = \eta * R_e^{0.875}$	3.696	0.980	0.017725	$t_c = 1023.42$	63.711
		0.020	1.645000	$t_f = 1020.62$	
(E) $D_{EF} = 2.157 * 10^{-4} * R_e^{0.764}$	3.573	0.980	0.017725	$t_c = 1023.42$	62.636
		0.020	1.645000	$t_f = 1020.67$	

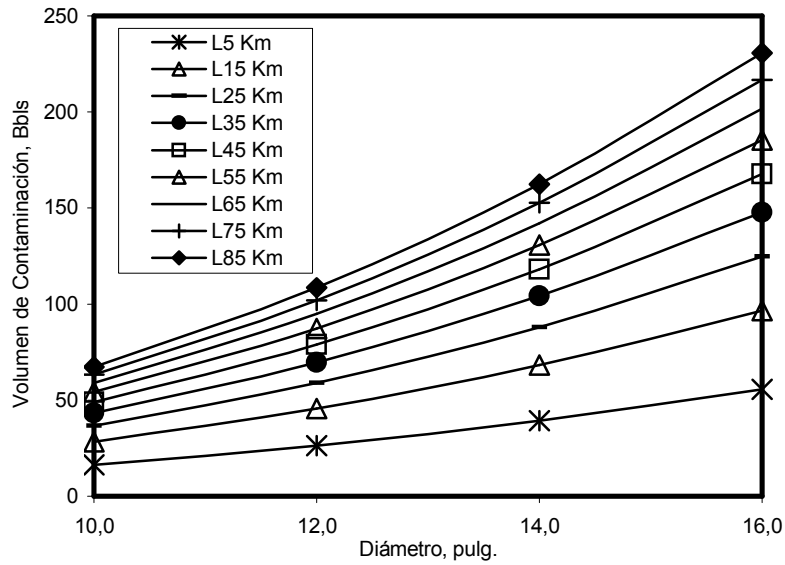


Figura 3. Variación del volumen del frente en función del diámetro y la longitud a caudal constante

Figure 3. Variation of the front volume as a function of diameter and length at constant flow rate

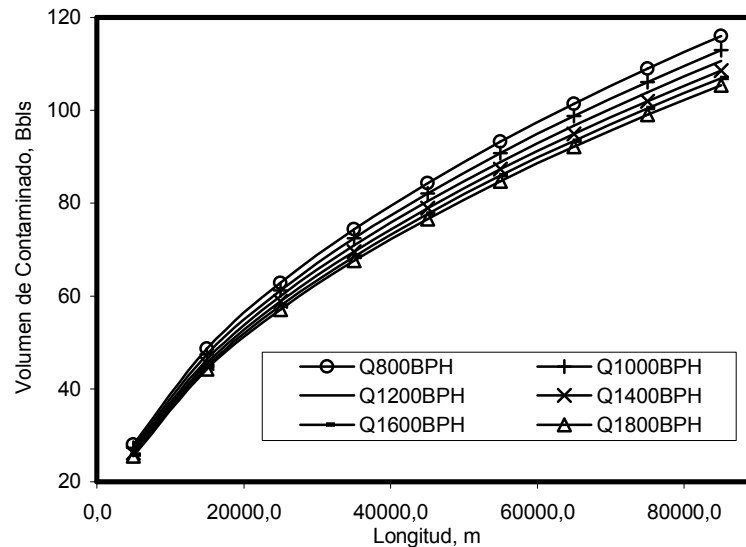


Figura 4. Variación del volumen del frente en función del caudal y la longitud a diámetro constante
Figure 4. Variation of the front volume as a function of flow rate and length at constant diameter

Como se puede ver en las figuras 3 y 4, los cambios más fuertes en el volumen de contaminación se dan por causa de la longitud que recorre el lote de producto, no así por la variación de la tasa de bombeo. El diámetro de la línea afecta en menor escala, aunque puede llegar a ser una variable determinante, pues a medida que el diámetro crece, el área transversal disponible para la formación de los remolinos es mayor favoreciéndose el mezclado. En los cálculos realizados se considero tubería lisa y recta despreciando el efecto que sobre el volumen de mezcla puede tener la presencia de accesorios como codos, tees, reducciones, válvulas, etc.

5. CONCLUSIONES

- Se logró implementar un modelo matemático simplificado que permite estimar el volumen de los frentes de contaminación generados por el transporte de productos del petróleo por baches en un poliducto. Dicho modelo construido a partir de principios básicos de transferencia de masa se puede resolver en forma analítica o numérica.

- La mayor dificultad para aplicar el modelo es el cálculo del coeficiente efectivo de transferencia de masa. Una aproximación analítica para el cálculo de dicho coeficiente sería sumamente complejo, motivo por el cual se han desarrollado diferentes correlaciones empíricas para su cálculo.
- Antes de aplicar el modelo a un tramo de poliducto dado, éste debe ajustarse usando datos de campo. La forma de ajuste propuesta en este trabajo es seleccionando la correlación para el coeficiente efectivo de transferencia que mejor simule una medida de campo del volumen del frente de contaminación.
- El modelo desarrollado permite analizar el efecto de variables como la tasa de flujo y las dimensiones del poliducto, diámetro y longitud, en el crecimiento del frente de contaminación. De las variables mencionadas, la longitud recorrida por los baches de productos es la que afecta en mayor medida el volumen del frente de contaminación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al personal de la Terminal La Maria de ECOPETROL en Medellín y al Laboratorio de Crudos y Derivados de la Facultad de Minas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Empresa Colombiana de Petróleos. Estudio sobre la contaminación de hidrocarburos durante el transporte por oleoducto. Bogotá D.C. ECOPETROL, 1988.
- [2] Empresa Colombiana de Petróleos. Programa de control de calidad para combustibles transportados por poliducto. Bogotá D.C. ECOPETROL, 1990.
- [3] TICHACEK, L. J. Axial mixing in pipes. *Oil and Gas Journal*. Vol. 97. No. 21. 439-442. 1957.
- [4] HUNT, B. Diffusion in laminar pipe flow. *Heat and Mass Transfer*. Vol. 20. No. 4. 393-401. 1997.
- [5] KREYSZIG, E. *Matemáticas Avanzadas para Ingeniería*. Limusa Wiley S.A. México. 2000.
- [6] WELTY, J. R., C. E. Wicks y R. E. Wilson. *Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa*. Limusa Noriega Editores. México. 1996.
- [7] BIRD, R. B., E. N. Lightfoot y W. E. Stewart. *Fenómenos del Transporte*. Reverté. México. 1993.
- [8] HIGHAM, D. J., N. J. Higham. *Matlab Guide*. SIAM: Society for industrial and applied mathematics. Philadelphia. 2000.
- [9] SHAKER, N. O., R. Mansour. Pilot line verifies calculations for interface length mixing. *Oil and Gas Journal*. Vol. 97. No. 21. 66-69. 1999.
- [10] BOTROS, K.A. Estimating contamination between batches in products line. *Oil and Gas Journal*. Vol. 82. No. 7. 112 – 114. 1984.
- [11] BAUM, J. S. Batching, treating keys to moving refined products in crude - oil line. *Oil and Gas Journal*. Vol. 96, No. 41. 49 – 55. 1995.