

DETERMINACION PRACTICA DE LA TEMPERATURA

DEL REVESTIDOR Y LA CALIDAD DEL

VAPOR EN UN POZO INYECTOR

Horacio M. Kostiría y M. Susana Bidner
Laboratorio de Ingeniería de Reservorios
Departamento de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de La Plata
La Plata - Argentina

RESUMEN

Se presenta un método práctico para estimar la calidad del vapor, el calor perdido y la temperatura del revestidor, durante una inyección de vapor en un pozo petrolífero. Se realiza un balance de energía en el fluido y se aplican las ecuaciones de transferencia de calor en estado estacionario a través de las paredes del pozo y de conducción transitoria en la formación.

Se han despreciado los cambios de presión y el gradiente geotérmico, para disminuir el número de variables. Los resultados se expresan en tablas utilizables por el ingeniero de campo. Este trabajo mejora las correlaciones gráficas de Huygen y Huitt³, y sus resultados se aproximan a los obtenidos numéricamente en forma rigurosa por Farouq Ali⁹.

ABSTRACT

This paper presents a practical method to estimate steam quality, wellbore heat losses, and casing temperatures during steam injection into an oil well. Energy balance is made in the injected fluid and the equations of heat transfer in a steady state through the annular completion of the well and the transient conduction in the formation are applied.

Pressure changes and geothermal gradients are neglected to reduce number of variables. Tables of results are presented for the use of the field engineer. This work improved the graphic correlations of Huygen and Huitt³, and its solutions are close to the solutions obtained by Farouq Ali⁹ through a more rigorous numerical process.

INTRODUCCION

Para estimar las pérdidas de calor a través de un pozo inyector, debemos analizar tres subsistemas: el vapor que fluye en el interior del pozo, las paredes anulares del mismo y la formación. La transferencia de energía se realiza en serie en esos tres subsistemas que, por ende, están acoplados.

Hasta 1969, los modelos propuestos para representar el problema se limitaban a plantear un balance de energía en el fluido inyectado donde se despreciaba la energía cinética y se suponía que los efectos gravitatorios y de fricción (de signos apuestos) se anulaban mutuamente. Ramey⁷, en 1962, considera el flujo monofásico (gas o agua caliente) e introduce por vez primera la solución analítica de la fuente lineal (Carlaw y Jaeger¹, 1959) para evaluar la conducción transitoria desde el pozo hacia la formación. Satter⁸, en 1965, toma en cuenta el efecto de la condensación y determina la variación de la calidad del vapor en función de la profundidad y del tiempo. Willhite¹⁰, en 1967, presenta un cálculo completo del coeficiente global de transferencia a través de las tuberías que visten el pozo. Para evaluar la conducción transitoria de calor hacia la formación utiliza una solución analítica hallada con la condición de contorno mixta en la interfase cemento-formación (Jessop⁶) pero desprecia el gradiente geotérmico.

En 1980, Kostiría y Bidner presentan un modelo más general, que requiere un cálculo numérico iterativo implementable en una computadora mediana para su solución; debido al acoplamiento de los flujos caloríficos en los tres subsistemas mencionados. Este modelo engloba a los anteriormente propuestos, que pasan a ser así sus casos límites.

Earlougher², en 1969; Pacheco y Farouq Ali⁵, en 1972 y Farouq Ali⁹, en 1979; realizan un análisis completo de lo que sucede en el interior del pozo, planteando simultáneamente los balances de masa, cantidad de movimiento y energía. Básicamente difieren en el régimen de flujo que ocurre en dos fases, lo que incide en el cálculo de las pérdidas por fricción, en la evaluación de las propiedades y consecuentemente en los perfiles de presión y de temperatura dentro de la tubería de inyección. Además, el último trabajo considera la conducción bidimensional en la formación para lo cual resuelve numéricamente las ecuaciones diferenciales parciales acopladas correspondientes.

Ahora bien, los ingenieros de yacimientos que deben estimar la pérdida de calor en un pozo inyector no pueden usar ninguno de los modelos anteriores, puesto que los programas de computadora en que se basan no están disponibles. En ese caso se recurre a la publicación de Huygen y Huitt³. Estos autores, en 1966, presentan gráficos, de los que

pueden obtenerse el calor perdido y la temperatura del revestidor. Se basan en la teoría de Ramey⁷. Los valores obtenidos con estos gráficos son bastante conservadores si se comparan con los resultados de los trabajos rigurosos. La diferencia se origina principalmente en la evaluación del coeficiente global de transferencia.

En esta comunicación se publican tablas que permiten determinar la calidad del vapor, el calor perdido y la temperatura del revestidor, en forma inmediata. Estas tablas representan un modelo simplificado, con el objeto de disminuir el número de variables involucradas, eliminando las de menor peso. En el primer subsistema -vapor inyectado- se realiza un balance de energía despreciando los términos de presión. En el segundo -terminación anular del pozo- se evalúa un coeficiente global de transferencia en forma completa de acuerdo con Willhite¹⁰. En el tercer subsistema -la formación- se considera la conducción transitoria unidimensional, eliminando el gradiente geotérmico con el objeto de expresar los resultados por unidad de profundidad del pozo.

Los resultados acá obtenidos se comparan con los modelos de Farouq Ali^{6,9}, Earlougher² y con los de Huygen y Huitt³. Para tiempos de inyección cortos y en las condiciones de operación corrientes nuestros valores se sitúan entre los de Farouq Ali y los de Huygen y Huitt. Para tiempos de inyección largos todos los métodos convergen.

TEORÍA

El modelo propuesto se basa en las siguientes suposiciones simplificatorias:

. Se inyecta vapor saturado por la tubería interior o por el revestidor según el caso. La calidad del vapor disminuye al aumentar la profundidad, pero sin condensarse completamente.

. Se desprecian los cambios de energía cinética. Se considera que la presión del vapor no varía con la profundidad, o sea que los efectos gravitatorios y de fricción se cancelan mutuamente.

. La transferencia de calor desde el fluido inyectado hacia la formación ocurre en estado cuasi-transitorio: a través de las paredes anulares del pozo en estado estacionario y desde la interfase cemento-formación hacia la tierra en estado transitorio.

. La tubería interior está desnuda, o revestida con pintura de aluminio, o aislada con silicato de calcio según el caso. El ánulo contiene aire a presión atmosférica.

. Se desprecia el gradiente geotérmico; la difusividad y conductividad térmicas de la tierra son constantes.

En consecuencia, el balance de energía en el

fluido inyectado es,

$$\dot{Q} + \dot{m} H_v \Delta y = 0 \quad (1)$$

siendo \dot{m} el caudal de fluido inyectado (lb/hr); H_v la entalpía de vaporización (BTU/lb); Δy la disminución del título entre la superficie y el fondo del pozo. El calor entregado por el vapor, \dot{Q} , se transfiere a través del vapor inyectado, de la tubería interior, del espacio anular, del revestidor y del cemento hacia la formación.

Se considera el flujo de calor a través de la terminación anular del pozo (desde el vapor hasta el cemento) en estado estacionario. Este flujo es proporcional a la diferencia de temperaturas entre el vapor y la interfase cemento-formación y al área transversal a la dirección del flujo.

Para una inyección a través de la tubería interior,

$$\dot{Q} = 2\pi r_{to} U_{to} (T_s - T_h) Z \quad (2)$$

Para una inyección a través del revestidor,

$$\dot{Q} = 2\pi r_{ci} U_{ci} (T_s - T_h) Z \quad (3)$$

donde r_{to} es el radio exterior de la tubería y r_{ci} es el radio interior del revestidor. T_s la temperatura del vapor, T_h la temperatura de la interfase cemento-formación; y Z la profundidad de la capa productiva. Los factores de proporcionalidad U_{to} y U_{ci} denominados coeficientes globales de transferencia de calor se estiman con el método de Willhite¹⁰. El coeficiente U_{to} correspondiente a la inyección por la tubería interior basado en el radio r_{to} , se evalúa despreciando la resistencia por convección en el vapor inyectado y por conducción en dicha tubería. Se consideran tres casos: tubería interior desnuda, con pintura de aluminio y con aislación comercial. Se tiene en cuenta la resistencia por conducción en la aislación; las resistencias en paralelo debidas a conducción, convección y radiación combinadas en el interior del ánulo lleno de aire; la conducción en el revestidor y en el cemento.

Entonces para inyección a través de la tubería interna,

$$U_{to} = \left[\frac{r_{to} \ln r_{ins}/r_{to}}{k_{ins}} + \frac{r_{to}}{r_{ins} (h'_c + h'_r)} + \frac{r_{to} \ln r_{co}/r_{ci}}{k_{cas}} + \frac{r_{to} \ln r_h/r_{co}}{k_{cem}} \right]^{-1} \quad (4)$$

donde r_{ins} es el radio exterior de la aislación; r_{co} el exterior del revestidor, r_h el de la interfase cemento-formación; k_{ins} , k_{cas} , k_{cem} son las conductividades de la aislación, del revestidor y del cemento; h'_e y h'_r son los coeficientes peliculares de conducción-convección combinadas y de radiación basados en el radio r_{ins} y la diferencia de temperaturas ($T_{ins} - T_{ci}$). Para la tubería interior desnuda o pintada $r_{ins} = r_{to}$, $h'_c = h_c$ y $h'_r = h_r$, donde h_c y h_r se basan en el radio r_{to} y la diferencia de temperaturas ($T_{to} - T_{ci}$).

Cuando se inyecta vapor por el revestidor,

$$U_{ci} = \left[\frac{r_{ci} \ln r_{co}/r_{ci}}{k_{cas}} + \frac{r_{ci} \ln r_h/r_{co}}{k_{cem}} \right]^{-1} \quad (5)$$

El calor transferido desde la interfase cemento-formación hacia la formación circundante en estado transitorio es,

$$\dot{Q} = \frac{2\pi k_e (T_h - T_e) Z}{f(t)} \quad (6)$$

donde $f(t)$ la función de conducción transitoria se estima de acuerdo con Ramey⁷; T_e es la temperatura no perturbada de la formación e k_e la conductividad térmica de la misma.

Los valores técnicos de interés son el calor perdido por unidad de longitud, Q^* la cantidad con que el vapor llega a la formación y la temperatura del revestidor. Todos ellos son funciones del tiempo. De las ecuaciones (2) y (4) se puede expresar Q^* en función de $(T_s - T_e)$ como,

$$Q^* = \frac{2\pi r_{to} U_{to} (T_s - T_e) k_e}{k_e + r_{to} U_{to} f(t)} \quad (7)$$

donde el valor U_{to} depende del aislamiento de la tubería. Si la inyección fuera por el revestidor, r_{ci} y U_{ci} reemplazarían a r_{to} y U_{to} .

La calidad del vapor en el fondo del pozo, se relaciona con la calidad del vapor inyectado y_i a través de la ecuación (1),

$$y = y_i - \frac{DZ}{m} \quad (8)$$

siendo $D = Q^*/H_v$

La ecuación (8) es un caso límite de la distribución de la calidad del vapor encontrado por Satter⁸ cuando se desprecian el gradiente geotérmico y la fuerza de gravedad.

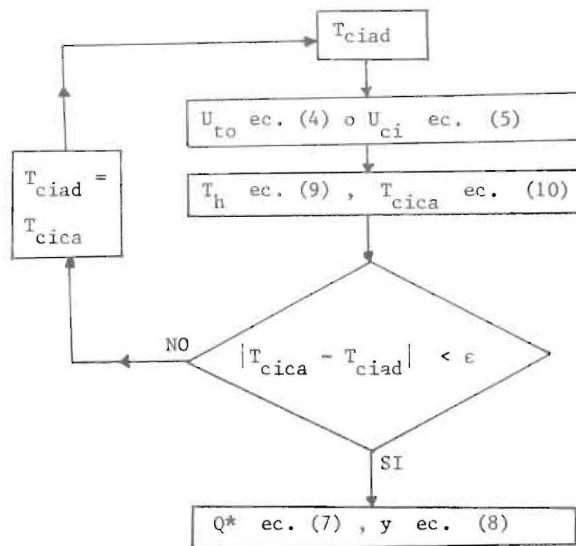
La temperatura interior del revestidor T_{cas} , y de la interfase cemento-formación según Willhite¹⁰,

$$T_{cas} = T_h + \left[\frac{\ln r_h/r_{co}}{k_{cem}} + \frac{\ln r_{co}/r_{ci}}{k_{cas}} \right] r_{to} U_{to} (T_s - T_h) \quad (9)$$

$$T_h = \frac{T_s f(t) + (k_e T_e / r_{to} U_{to})}{f(t) + (k_e / r_{to} U_{to})} \quad (10)$$

PROCEDIMIENTO

Para hallar el calor perdido, la calidad del vapor en el fondo del pozo y la temperatura del revestidor en cada instante, se debe evaluar primero el coeficiente global de transferencia de calor de la ecuación (4) o (5). El cálculo de este coeficiente implica conocer las conductividades y los coeficientes de película para lo cual se necesita la distribución de temperaturas. La solución se encuentra entonces por un procedimiento iterativo ya que las ecuaciones (4), (7), (8), (9) y (10) están acopladas.



donde T_{ciad} y T_{cica} significan temperaturas del revestidor adoptada y calculada.

