

MÉTODO Y APARATO PARA LA ESTIMULACIÓN SÍSMICA DE HORIZONTES DE PRODUCCIÓN DE FORMACIONES QUE CONTENGAN HIDROCARBUROS

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

5 La presente invención se refiere a un método y dispositivo de generación de ondas de choque y, más particularmente, a un método y dispositivo para generar repetidamente ondas de choque en una perforación de pozo a fin de mejorar la recuperación de petróleo y aumentar la producción de petróleo y de realizar estudios sísmicos continuos de una formación que contenga hidrocarburos.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA ANTERIOR

10 Las patentes estadounidenses No. 6,015,010, No. 6,899,175 y No.7,980,301 revelan métodos y aparatos para aumentar la eficiencia de la estimulación de ondas de choque de los yacimientos que contienen hidrocarburos. Sin embargo, la implementación de métodos de conformidad con las patentes estadounidenses No.
15 6,015,010, No. 6,899,175, No. 8,459,351 y No.7,980,301 tiene sus desventajas, es decir, los métodos y aparatos no son los óptimos desde el punto de vista de la eficiencia de los dispositivos implementados de conformidad con las patentes estadounidenses No. 6,015,010, No. 6,899,175, No. 8,459,351 y No.7,980,301. En particular, la eficacia de la implementación de dispositivos podría mejorarse
20 sustancialmente desde el punto de vista que coincida la frecuencia de vibración generada con la llamada frecuencia dominante del horizonte de producción con hidrocarburos.

 La presente invención se desarrolló para superar las desventajas de los métodos y dispositivos anteriores proporcionando el método y aparato mejorados
25 para producir ondas de choque en una perforación del pozo lleno o parcialmente lleno

con el líquido.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

Por consiguiente, un objeto primario de una primera realización de la presente invención es proporcionar el método para producir una onda de choque en pozos
5 llenos o parcialmente llenos con un líquido el cual incluye una unidad de bombeo dispuesta en la cabeza de pozo, una sarta de tuberías que se extiende de bajada hacia la perforación del pozo, un cilindro de amortiguamiento conectado al fondo de la sarta de tuberías en el extremo superior y a una cámara de amortiguamiento en el extremo inferior. La cámara de amortiguamiento está conectada a un cilindro
10 superior. Además, el cilindro de amortiguamiento tiene un diámetro interno diferente al diámetro interno del cilindro superior. El émbolo de amortiguamiento está dispuesto en forma movable dentro del cilindro de amortiguamiento y conectado a la unidad de bombeo por medio de al menos un varilla de succión y una varilla pulida en el extremo superior y al émbolo superior, que a su vez está dispuesto en forma
15 movable dentro del cilindro superior, en el extremo inferior para crear una contrafuerza constante adentro de la cámara de amortiguamiento en la carrera ascendente de la unidad de bombeo como resultado de un flujo constante del fluido de la cámara de amortiguamiento hacia la perforación del pozo o desde la perforación del pozo hacia la cámara de amortiguamiento a través de al menos un orificio en la
20 superficie lateral de la cámara de amortiguamiento o, como una alternativa, a través del canal adentro de un émbolo de amortiguamiento que conecta hidráulicamente la cámara de amortiguamiento con la sarta de tuberías. Además, el cilindro superior está conectado a un cilindro inferior por medio de una cámara de compresión y el cilindro superior tiene un diámetro interno más pequeño que el cilindro inferior. Un émbolo
25 inferior dispuesto en forma movable dentro del cilindro inferior y los émbolos

superior e inferior están conectados entre sí por medio de al menos una varilla de succión para comprimir un líquido contenido dentro de la cámara de compresión y descargar el líquido en la perforación de un pozo cuando el émbolo inferior sale del cilindro inferior en la carrera ascendente de una unidad de bombeo generando así una onda de choque. Además, se proporciona una longitud de la carrera ascendente L_{str} de la unidad de bombeo determinada por la siguiente expresión:

$$L_{str} \geq H_1 + \frac{(D_1^2 - D_2^2)A_{sw}L_2}{Ed_r^2},$$

donde H_1 es la longitud del cilindro inferior, L_2 es la distancia entre la parte superior del émbolo inferior y la parte inferior del émbolo superior, D_1 es el diámetro del émbolo inferior, D_2 es el diámetro del émbolo superior, A_{sw} es la amplitud requerida de la onda de choque generada, E es un módulo de la elasticidad del material de la varilla de succión, d_r es el diámetro de las varillas de succión.

Otro objeto de la invención es proporcionar el método para producir una onda de choque en pozos llenos o parcialmente llenos con líquido en los cuales la unidad de bombeo opera durante desde 1 minuto hasta 24 horas al día.

Un objeto adicional de la presente invención es proporcionar un aparato para producir una onda de choque en pozos llenos o parcialmente llenos con el líquido que incluye el dispositivo conectado al fondo de la sarta de tuberías en la perforación del pozo lleno con el líquido y consta del cilindro de amortiguamiento conectado al fondo de la sarta de tuberías en el extremo superior y a la cámara de amortiguamiento en el extremo inferior y la cámara de amortiguamiento está conectada al cilindro superior, el cilindro de amortiguamiento tiene un diámetro interno diferente al diámetro interno del cilindro superior y la cámara de amortiguamiento tiene una conexión hidráulica con la perforación del pozo por medio de al menos un orificio en su superficie lateral, un émbolo de amortiguamiento dispuesto en forma movable dentro del cilindro de

amortiguamiento y conectado a la unidad de bombeo por medio de al menos una varilla de succión y una varilla pulida en el extremo superior y conectado al émbolo superior por a la menos una varilla de succión en el extremo inferior para crear la contrafuerza constante adentro de la cámara de amortiguamiento en la carrera ascendente de la unidad de bombeo como resultado del flujo constante del fluido de la cámara de amortiguamiento hacia la perforación del pozo o desde la perforación del pozo hacia la cámara de amortiguamiento a través de al menos un orificio en la superficie lateral de la cámara de amortiguamiento o, como una alternativa, a través del canal adentro de un émbolo de amortiguamiento que conecta hidráulicamente la cámara de amortiguamiento con la sarta de tuberías, el cilindro superior conectado a un cilindro inferior por medio de la cámara de compresión y teniendo el diámetro interno más pequeño que el diámetro interno del cilindro inferior, el émbolo superior conectado al émbolo inferior por medio de al menos una varilla de succión y los émbolos superior e inferior dispuestos en forma movable dentro de los cilindros superior e inferior, proporcionalmente, para comprimir el líquido contenido dentro de la cámara de compresión y descargar el líquido hacia la perforación cuando el émbolo inferior sale del cilindro inferior en la carrera ascendente de la unidad de bombeo generando así la onda de choque. Además, el émbolo inferior tiene al menos un ahusamiento cónico truncado en el extremo inferior y el citado ahusamiento cónico truncado tiene un ángulo Ψ en relación con un eje de simetría vertical del émbolo inferior determinado por las siguientes fórmulas:

$$\psi = \frac{1}{3} \arccos ine \left[\frac{2S(1-\phi)n_s L_{str} (D_1^2 - d_r^2)}{C_s \Delta t D_1^3} \right],$$

donde Ψ es el ángulo del ahusamiento cónico truncado en el extremo inferior del émbolo inferior, ϕ es un deslizamiento total del fluido entre los cilindros inferior y superior y los émbolos inferior y superior, proporcionalmente, n_s es un número de

Strouhal, L_{str} es la longitud de la carrera ascendente de la unidad de bombeo, D_1 es el diámetro del émbolo inferior, d_r es el diámetro de las varillas de succión, C_s es una velocidad de una onda de corte en la subcapa de formación con hidrocarburos, Δt es el tiempo de descarga del líquido comprimido de la cámara de compresión, S es un espesor de la subcapa de formación con hidrocarburos que tiene la frecuencia dominante particular.

Otro objeto de la invención es proporcionar el aparato para producir la onda de choque en pozos llenos o parcialmente llenos con el líquido en donde la longitud l del ahusamiento cónico truncado en el extremo inferior del émbolo inferior es determinada por la siguiente expresión:

$$0.1D_1 \leq l \leq \frac{D_1}{2 \tan \psi},$$

donde l es la longitud del ahusamiento cónico truncado en el extremo inferior del émbolo inferior, D_1 es el diámetro del émbolo inferior, ψ es el ángulo del ahusamiento cónico truncado en el extremo inferior del émbolo inferior.

Otro objeto de la invención es proporcionar el aparato para producir la onda de choque en pozos llenos o parcialmente llenos con el líquido en donde el émbolo inferior tiene un ahusamiento esférico truncado en el extremo inferior y el citado ahusamiento esférico truncado tiene un radio esférico R y el diámetro d_s en el fondo del citado ahusamiento esférico truncado determinado por las siguientes expresiones:

$$d_s = D_1 - l \tan \psi$$

$$R \geq l \cos \psi$$

donde l es la longitud del citado ahusamiento cónico truncado en el extremo inferior del émbolo inferior, D_1 es el diámetro del émbolo inferior, ψ es el ángulo del citado ahusamiento cónico truncado en el extremo inferior del émbolo inferior.

Otro objeto de la invención es proporcionar el aparato para producir la onda

de choque en pozos llenos o parcialmente llenos con el líquido en donde el émbolo inferior tiene un ahusamiento elipsoidal truncado y el diámetro d_e en el fondo del citado ahusamiento elipsoidal truncado es determinado por la siguiente expresión:

$$d_e = D_1 - l \tan \psi ,$$

5 donde l es la longitud del citado ahusamiento cónico truncado en el extremo inferior del émbolo inferior, D_1 es el diámetro del émbolo inferior, ψ es el ángulo del citado ahusamiento cónico truncado en el extremo inferior del émbolo inferior.

Otro objeto de la invención es proporcionar el aparato para producir la onda de choque en pozos llenos o parcialmente llenos con el líquido en donde el émbolo inferior tiene un ahusamiento hiperbólico truncado y el diámetro d_h en el fondo del
10 citado ahusamiento hiperbólico truncado es determinado por la siguiente expresión:

$$d_h = D_1 - l \tan \psi ,$$

donde l es la longitud del citado ahusamiento cónico truncado en el extremo inferior del émbolo inferior, D_1 es el diámetro del émbolo inferior, ψ es el ángulo del citado
15 ahusamiento cónico truncado en el extremo inferior del émbolo inferior.

Otro objeto de la invención es proporcionar el aparato para producir la onda de choque en pozos llenos o parcialmente llenos con el líquido en donde la distancia L_2 entre la parte superior del émbolo inferior y la parte inferior del émbolo superior es determinada por la siguiente expresión:

$$20 \quad \frac{H_1 + L_1 - (l_1 + l_2 + L_{str})}{1 - \frac{(D_1^2 - D_2^2)A_{sw}}{Ed_r^2}} \leq L_2 \leq (H_1 + H_2 + L_1) - (l_1 + l_2 + L_{str}) ,$$

donde H_1 es la longitud del cilindro inferior, H_2 es la longitud del cilindro superior, l_1 es la longitud del émbolo inferior, L_1 es la longitud de la cámara de compresión, l_2 es la longitud del émbolo superior, L_{str} es la longitud de la carrera ascendente de la unidad de bombeo, D_1 es el diámetro del émbolo inferior, D_2 es el diámetro del

émbolo superior, A_{sw} es la amplitud requerida de la onda de choque generada, E es el módulo de la elasticidad del material de la varilla de succión, d_r es el diámetro de las varillas de succión.

Otro objeto de la invención es proporcionar el aparato para producir la onda de choque en pozos llenos o parcialmente llenos con el líquido en donde la distancia L_4 entre la parte inferior del émbolo de amortiguamiento y la parte superior del émbolo superior es determinada por la siguiente expresión:

$$\frac{H_1 + H_2 + H_3 + L_1 + L_3 - (l_1 + l_2 + L_2 + l_3 + L_{str}) \leq L_4 \leq (H_1 + H_2 + H_3 + L_1 + L_3 + l_3) - (l_1 + l_2 + L_2 + L_{str})}{},$$

donde H_1 es la longitud del cilindro inferior, H_2 es la longitud del cilindro superior, l_1 es la longitud del émbolo inferior, L_1 es la longitud de la cámara de compresión, l_2 es la longitud del émbolo superior, l_3 es la longitud del émbolo de amortiguamiento, H_3 es la longitud del cilindro de amortiguamiento, L_3 es la longitud de la cámara de amortiguamiento, L_2 es la distancia entre la parte superior del émbolo inferior y la parte inferior del émbolo superior, L_{str} es la longitud de la carrera de la unidad de bombeo.

Otro objeto de la invención es proporcionar el aparato para producir la onda de choque en pozos llenos o parcialmente llenos con el líquido en donde con el fin de proporcionar el fondo óptimo de la carrera ascendente de la unidad de bombeo, la longitud total de las varillas de succión que conectan la parte superior del émbolo de amortiguamiento y la parte inferior de la citada varilla pulida es reducida en comparación con la longitud nominal L_5 de las varillas de succión que conectan la parte superior del émbolo de amortiguamiento y la parte inferior de la citada varilla pulida por la distancia λ determinada por las siguientes fórmulas:

$$\lambda \geq \frac{H}{E} \left[\frac{(D_1^2 - D_2^2) A_{sw}}{d_r^2} + \frac{gH(\rho_s - \rho_f)}{2} \right] + H\eta,$$

donde D_1 es el diámetro del émbolo inferior, D_2 es el diámetro del émbolo superior, A_{sw} es la amplitud requerida de la onda de choque generada, H es la profundidad de la parte inferior del émbolo inferior en el fondo de la carrera ascendente de la unidad de bombeo, E es el módulo de la elasticidad del material de la varilla de succión, d_r es el diámetro de las varillas de succión, ρ_s es una densidad del material del mecanismo de bombeo, ρ_l es la densidad del líquido, $\pi = 3.1415$, η es un coeficiente de pandeo de las varillas de succión adentro de la tubería por unidad de la longitud de la tubería.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Otros objetos y ventajas de la invención serán aparentes a partir del estudio de la siguiente especificación cuando se observa teniendo en cuenta los dibujos adjuntos, en donde:

La **FIG. 1** es una vista lateral transversal del dispositivo instalado en la perforación del pozo de acuerdo con la invención.

La **FIG. 2** es una vista transversal de la cámara de compresión, el cilindro inferior y el émbolo inferior con el ahusamiento cónico truncado.

La **FIG. 3** es una vista del émbolo inferior con el ahusamiento esférico truncado.

La **FIG. 4** es una vista del émbolo inferior con el ahusamiento elipsoidal truncado.

La **FIG. 5** es una vista del émbolo inferior con el ahusamiento hiperbólico truncado.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

Haciendo referencia a la **FIG. 1**, ahí se muestra un dispositivo para producir una onda de choque en la perforación **19** de un pozo lleno o parcialmente lleno con el líquido **2**. El dispositivo incluye una unidad de bombeo (no se muestra) dispuesta en

la cabeza de pozo del pozo, una sarta de tuberías **6** que se extiende de bajada hacia la tubería de revestimiento de producción **5** del pozo, el cilindro de amortiguamiento **12** instalado en el extremo de la sarta de tuberías **6**, la cámara de amortiguamiento **8** instalada en el extremo del cilindro de amortiguamiento **12** y conectada al cilindro superior **20** que a su vez está conectada a la cámara de compresión **22** conectada al cilindro inferior **26**. El émbolo de amortiguamiento **11** está dispuesto en forma movable dentro del cilindro de amortiguamiento **12** y conectado en su extremo superior a la unidad de bombeo por medio de al menos una varilla de succión **4** y una varilla pulida **1** dispuestas en forma movable en el prensaestopas **3** y conectado en su extremo inferior por medio de al menos una varilla de succión **7** al émbolo superior **32** para crear una contrafuerza constante adentro de la citada cámara de amortiguamiento **8** en una carrera ascendente de la unidad de bombeo como resultado del flujo constante del fluido de la cámara de amortiguamiento **8** hacia la perforación **19** del pozo o de la perforación del pozo **19** hacia la cámara de amortiguamiento **8** a través de al menos un orificio (no se muestra) en la superficie lateral de la cámara de amortiguamiento **8** y el citado émbolo superior **32** está dispuesto en forma movable dentro del cilindro superior **20**. La varilla pulida **1**, a su vez, está conectada al cabezal del balancín (no se muestra) de la unidad de bombeo por el portador **9**. El émbolo superior **32** está conectado en su extremo inferior al émbolo inferior **34** por medio de al menos una varilla de succión **13** y el émbolo inferior **34** está dispuesto en forma movable dentro del cilindro inferior **26** para comprimir un líquido contenido dentro de la cámara de compresión **22** y descargar el líquido hacia la perforación **19** del pozo cuando el émbolo inferior **34** sale del cilindro inferior **26** en la carrera ascendente de la unidad de bombeo generando así una onda de choque. Además, se proporciona una longitud de la carrera L_{str} de la unidad de bombeo determinada por

la siguiente expresión:

$$L_{str} \geq H_1 + \frac{(D_1^2 - D_2^2)A_{sw}L_2}{Ed_r^2},$$

donde H_1 es la longitud del cilindro inferior **26**, L_2 es la distancia entre la parte superior del émbolo inferior **34** y la parte inferior del émbolo superior **32**, D_1 es el diámetro del émbolo inferior **34**, D_2 es el diámetro del émbolo superior **32**, A_{sw} es la amplitud requerida de la onda de choque generada, E es un módulo de elasticidad del material de la varilla de succión, d_r es el diámetro de las varillas de succión **4**, **7** y **13**. En particular, la longitud de carrera $L_{str} \geq 3.66$ m para los siguientes parámetros: $H_1 = 3.65$ m, $L_2 = 32$ m, $D_1 = 0.082$ m, $D_2 = 0.07$ m, $A_{sw} = 24.5$ MPa, $E = 2 \times 10^{11}$ Pa, $d_r = 0.0254$ m.

Como se muestra en la **FIG.1**, ahí está la subcapa de formación con hidrocarburos **27** teniendo un espesor S . Cada subcapa **27** particular tiene su propia, llamada, frecuencia dominante f_d , es decir, la frecuencia en la cual las ondas elásticas se propagan a través de esta subcapa **27** con el coeficiente de atenuación más bajo llegando así a una distancia más lejana en comparación con las ondas elásticas en otras frecuencias. La frecuencia dominante f_d puede calcularse con la sencilla expresión (véase por ejemplo V.N. Nikolayevsky et. al., “Residual Oil Reservoir Recovery with Seismic Vibrations”, SPE 29155, Production & Facility, mayo de 1995, páginas 89-94):

$$f_d = \frac{C_s}{4S},$$

en donde C_s es una velocidad de una onda de corte en la subcapa de formación con hidrocarburos **27** y S es un espesor de la subcapa de formación con hidrocarburos **27** que tiene la frecuencia dominante particular f_d . Por otro lado, cuando el émbolo inferior **34** sale del cilindro inferior **26** en cada carrera ascendente de la unidad de bombeo generando así la onda de choque, el flujo descargado de líquido, a su vez,

genera las vibraciones debido a la creación de vórtices periódicos **14** de conformidad con el fenómeno bien conocido de las auto-oscilaciones descubierto por V. Strouhal en el siglo 19. Pueden encontrarse más detalles acerca del fenómeno de las auto-oscilaciones, por ejemplo, en los artículos: Sobey, Ian J. (1982). "Oscillatory flows at intermediate Strouhal number in asymmetry channels". Journal of Fluid Mechanics, N. 125: 359–373 y Sakamoto, H.; Haniu, H. (1990). "A study on vortex shedding from spheres in uniform flow". Journal of Fluids Engineering, N 112 (Diciembre de 1992): 386–392. Por lo tanto, el objeto adicional de la presente invención es proporcionar un aparato para producir ondas de choque que, a su vez, generan las vibraciones en la frecuencia igualada a la frecuencia dominante f_d proporcionando así el modo resonante. Dicho aparato en los pozos llenos o parcialmente llenos con líquido que incluye el dispositivo conectado al fondo de la sarta de tuberías **6** en la perforación **19** del pozo lleno con líquido y que consta del cilindro de amortiguamiento **12** conectado al fondo de la sarta de tuberías **6** en el extremo superior y a la cámara de amortiguamiento **8** en el extremo inferior y la cámara de amortiguamiento **8** está conectada al cilindro superior **20**, el cilindro de amortiguamiento **12** teniendo un diámetro interno diferente al diámetro interno del cilindro superior **20** y la cámara de amortiguamiento **8** tiene una conexión hidráulica con la perforación **19** del pozo por medio de al menos un orificio en la superficie lateral de la citada cámara de amortiguamiento **8** o, como una alternativa, a través del canal (no se muestra) adentro del émbolo de amortiguamiento **11** que conecta hidráulicamente la cámara de amortiguamiento **8** con la sarta de tuberías **6**, el émbolo de amortiguamiento **11** dispuesto en forma movable dentro del cilindro de amortiguamiento **12** y conectado a la unidad de bombeo por medio de al menos una varilla de succión **4** y una varilla pulida **1** en el extremo superior y conectado al

émbolo superior **32** por al menos una varilla de succión **7** en el extremo inferior para
 crear una contrafuerza constante adentro de la cámara de amortiguamiento **8** en la
 carrera ascendente de la unidad de bombeo como resultado de un flujo constante del
 fluido desde la cámara de amortiguamiento **8** hacia la perforación **19** del pozo o desde
 la perforación **19** del pozo hacia la cámara de amortiguamiento **8** a través de al menos
 un orificio en la superficie lateral de la cámara de amortiguamiento **8**, el cilindro
 superior **20** conectado a un cilindro inferior **26** por medio de una cámara de
 compresión **22** y teniendo un diámetro interno más pequeño que el diámetro interno
 del cilindro inferior **26**, el émbolo superior **32** conectado al émbolo inferior **34** por
 medio de al menos una varilla de succión **13** y los émbolos superior **32** e inferior **34**
 dispuestos en forma movable dentro de los cilindros superior **20** e inferior **26**,
 proporcionalmente, para comprimir un líquido contenido dentro de la cámara de
 compresión **22** y descargar el líquido hacia la perforación **19** cuando el émbolo
 inferior **34** sale del cilindro inferior **26** en la carrera ascendente de la unidad de
 bombeo generando así la onda de choque. Además, el émbolo inferior **34** tiene al
 menos un ahusamiento cónico truncado **16** en el extremo inferior (véase la **FIG. 2**) y
 el citado ahusamiento cónico truncado **16** tiene un ángulo Ψ en relación con un eje de
 simetría vertical del émbolo inferior **34** determinado por las siguientes fórmulas:

$$\psi = \frac{1}{3} \arccos \operatorname{ine} \left[\frac{2S(1-\phi)n_s L_{str} (D_1^2 - d_r^2)}{C_s \Delta t D_1^3} \right],$$

en donde Ψ es el ángulo del ahusamiento cónico truncado **16** en el extremo inferior
 del émbolo inferior **34**, ϕ es el deslizamiento total del fluido entre los cilindros
 inferior **26** y superior **20** y los émbolos inferior **34** y superior **32**, proporcionalmente,
 n_s es el número de Strouhal, L_{str} es la longitud de la carrera ascendente del medio de
 bombeo, D_1 es el diámetro del émbolo inferior **34**, d_r es el diámetro de las varillas de
 succión **13**, C_s es una velocidad de una onda de corte en la subcapa de formación con

hidrocarburos **27**, Δt es el tiempo de descarga del líquido comprimido de la cámara de compresión **22**, S es un espesor de la subcapa de formación con hidrocarburos **27** teniendo la frecuencia dominante particular f_d .

El ángulo Ψ del ahusamiento cónico truncado **16** en el extremo inferior del émbolo inferior **34** proporciona el régimen de flujo del líquido descargado de la cámara de compresión **22** de tal manera que los vórtices **14** que aparecen estarán ocurriendo en la frecuencia dominante f_d proporcionando así el fenómeno resonante. En particular, para la frecuencia dominante $f_d = 150$ Hz, el ángulo Ψ del ahusamiento cónico truncado **16** tiene que ser igualado a 17° para proporcionar la resonancia bajo los siguientes parámetros: $S = 2.5$ m, $\phi = 0.1$, $n_s = 0.21$, $L_{str} = 3.6$ m, $D_1 = 0.082$ m, $d_r = 0.0254$ m, $C_s = 1500$ m/sec, $\Delta t = 0.04$ sec.

Al mismo tiempo que la longitud l , el ahusamiento cónico truncado **16** descrito por la siguiente expresión:

$$0.1D_1 \leq l \leq \frac{D_1}{2 \tan \Psi}$$

variará en la gama de $0.0082 \text{ m} \leq l \leq 0.134 \text{ m}$ para $D_1 = 0.082 \text{ m}$ y $\Psi = 17^\circ$.

Haciendo referencia a la **FIG. 3**, el ahusamiento truncado en el extremo inferior del émbolo inferior **34** puede tener la forma esférica. En este caso, el radio de la esfera R y el diámetro d_s de la parte baja del ahusamiento esférico truncado **21** son determinados por las siguientes expresiones:

$$d_s = D_1 - l \tan \Psi \text{ y}$$

$$R \geq l \cos \Psi ,$$

en donde l es la longitud del ahusamiento cónico truncado **16** en el extremo inferior del émbolo inferior **34**, D_1 es el diámetro del émbolo inferior **34**, Ψ es el ángulo del ahusamiento cónico truncado **16** en el extremo inferior del émbolo inferior.

En particular, $R \geq 0.048$ v para $l = 0.05$ m y $\Psi = 17^\circ$ y $d_s = 0.035$ m.

Haciendo referencia a la **FIG. 4** y la **FIG. 5**, el ahusamiento truncado en el extremo del émbolo inferior **34** puede tener la forma elipsoidal o hiperbólica, en la misma medida. Para los mismos parámetros, $l = 0.05$ m y $\Psi = 17^\circ$, los diámetros correspondientes d_e y d_h del ahusamiento elipsoidal truncado **18** y el ahusamiento hiperbólico truncado **20** son igualados: $d_e = d_h = 0.035$ m para $l = 0.05$ m y $\Psi = 17^\circ$.

Durante la instalación del dispositivo de conformidad con la invención (véase la **FIG. 1**), la distancia L_2 entre la parte superior del émbolo inferior **34** y la parte inferior del émbolo superior **32** tiene que determinarse de conformidad con la siguiente expresión:

$$\frac{H_1 + L_1 - (l_1 + l_2 + L_{str})}{1 - \frac{(D_1^2 - D_2^2)A_{sw}}{Ed_r^2}} \leq L_2 \leq (H_1 + H_2 + L_1) - (l_1 + l_2 + L_{str}),$$

en donde H_1 es la longitud del cilindro inferior **26**, H_2 es la longitud del cilindro superior **20**, l_1 es la longitud del émbolo inferior **34**, L_1 es la longitud de la cámara de compresión **22**, l_2 es la longitud del émbolo superior **32**, L_{str} es la longitud de la carrera ascendente de la unidad de bombeo, D_1 es el diámetro del émbolo inferior **34**, D_2 es el diámetro del émbolo superior **32**, A_{sw} es la amplitud requerida de la onda de choque generada, E es el módulo de la elasticidad del material de la varilla de succión, d_r es el diámetro de las varillas de succión **13**. En particular, la distancia L_2 entre la parte superior del émbolo inferior **34** y la parte inferior del émbolo superior **32** varía en la gama de $28.5 \text{ m} \leq L_2 \leq 34.24 \text{ m}$ para los siguientes parámetros: $H_1 = 5.3$ m, $H_2 = 6.0$ m, $l_1 = 1.2$ m, $L_1 = 29$ m, $l_2 = 1.2$ m, $L_{str} = 3.66$ m, $D_1 = 0.082$ m, $D_2 = 0.070$ m, $A_{sw} = 24.5 \times 10^6$ Pa, $E = 2.12 \times 10^{11}$ Pa, $d_r = 0.0254$ m.

La determinación similar de la distancia L_4 entre la parte inferior del émbolo de amortiguamiento **11** y la parte superior del émbolo superior **32** deberá cumplir con la siguiente expresión:

$$\frac{H_1 + H_2 + H_3 + L_1 + L_3 - (l_1 + l_2 + L_2 + l_3 + L_{str})}{(H_1 + H_2 + H_3 + L_1 + L_3 + l_3) - (l_1 + l_2 + L_2 + L_{str})} \leq L_4 \leq$$

en donde **H₁** es la longitud del cilindro inferior **26**, **H₂** es la longitud del cilindro superior **20**, **l₁** es la longitud del émbolo inferior **34**, **L₁** es la longitud de la cámara de compresión **22**, **l₂** es la longitud del émbolo superior **32**, **l₃** es la longitud del émbolo de amortiguamiento **11**, **H₃** es la longitud del cilindro de amortiguamiento **12**, **L₃** es la longitud de la cámara de amortiguamiento **8**, **L₂** es la distancia entre la parte superior del émbolo inferior **34** y la parte inferior del émbolo superior **32**, **L_{str}** es la longitud de la carrera ascendente de la unidad de bombeo.

En particular, la distancia **L₄** entre la parte inferior del émbolo de amortiguamiento **11** y la parte superior del émbolo superior **32** varía en la gama de $16.64 \text{ m} \leq L_4 \leq 19.04 \text{ m}$ para los siguientes parámetros: **H₁** = 5.3 m, **H₂** = 6.0 m, **H₃** = 6.0 m, **l₁** = 1.2 m, **L₁** = 29 m, **L₂** = 32 m, **L₃** = 9.6 m, **l₂** = 1.2 m, **l₃** = 1.2 m, **L_{str}** = 3.66 m.

Durante la instalación del dispositivo de conformidad con la invención (véase la **FIG. 1**), el pandeo de las varillas de succión **4**, **7**, **13**, así como el estiramiento de las varillas de succión **4**, **7**, **13** en la carrera ascendente de la unidad de bombeo deberán ser compensados para proporcionar el fondo óptimo de la carrera ascendente de la unidad de bombeo. En este caso, la longitud total de las varillas de succión que conectan la parte superior del émbolo de amortiguamiento **11** a la parte inferior de la varilla pulida **1** es reducida en comparación con la longitud nominal **L₅** de las varillas de succión **4** que conectan la parte superior del émbolo de amortiguamiento **11** a la parte inferior de la citada varilla pulida por una distancia λ determinada por las siguientes fórmulas:

$$\lambda \geq \frac{H}{E} \left[\frac{(D_1^2 - D_2^2) A_{sw}}{d_r^2} + \frac{gH(\rho_s - \rho_f)}{2} \right] + H\eta,$$

donde D_1 es el diámetro del émbolo inferior **34**, D_2 es el diámetro del émbolo superior **32**, A_{sw} es la amplitud requerida de la onda de choque generada, H es la profundidad de la parte inferior del émbolo inferior **34** en el fondo de la carrera ascendente de la unidad de bombeo, E es un módulo de elasticidad del material de la varilla de succión, d_r es el diámetro de las varillas de succión **4**, ρ_s es la densidad del material de la varilla de succión, ρ_l es la densidad del líquido, $\pi = 3.1415$, η es un coeficiente de pandeo de las varillas de succión **4** adentro de la sarta de tuberías **6** por unidad de longitud de la tubería (varía entre 0.001 a 0.003 dependiendo del tamaño de la sarta de tuberías **6** y las varillas de succión **4** adentro de esta sarta de tuberías **6**). La longitud nominal L_5 de las varillas de succión **4** corresponde a la posición de la varilla pulida **1** cuando la sarta completa de varillas de succión que consta de las varillas de succión **4**, **7** y **13** y la varilla pulida **1** están resaltadas.

En particular, la distancia $\lambda \geq 2.79$ m para los siguientes parámetros: $D_1 = 0.082$ m, $D_2 = 0.07$ m, $A_{sw} = 24.5 \times 10^6$ Pa, $E = 2.12 \times 10^{11}$ Pa, $H = 1500$ m, $d_r = 0.0254$ m, $\rho_s = 7800$ kg/m³, $\rho_l = 1000$ kg/m³, $\pi = 3.1415$, $\eta = 0.0013$ (para varillas de succión de 1 pulgada y tubería de 2 7/8 pulgadas), $g = 9.81$ m/sec².

Aun cuando, de conformidad con las disposiciones de la Ley de Patentes, se han ilustrado y descrito las formas preferidas y las realizaciones de la invención, será aparente para las personas con experiencia ordinaria en la técnica que pueden hacerse varios cambios y modificaciones sin desviarse de los conceptos inventivos antes establecidos.