



Assinado
Digitalmente

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

CARTA PATENTE Nº PI 0819608-7

O INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL concede a presente PATENTE DE INVENÇÃO, que outorga ao seu titular a propriedade da invenção caracterizada neste título, em todo o território nacional, garantindo os direitos dela decorrentes, previstos na legislação em vigor.

(21) Número do Depósito: PI 0819608-7

(22) Data do Depósito: 26/11/2008

(43) Data da Publicação do Pedido: 11/06/2009

(51) Classificação Internacional: E21B 47/10.

(30) Prioridade Unionista: US 61/058,944 de 05/06/2008; US 61/004,877 de 30/11/2007.

(54) Título: MÉTODOS PARA MONITORAR ESCOAMENTO DE FLUIDO E PARA PRODUZIR HIDROCARBONETOS ATRAVÉS DE ONDAS ACÚSTICAS

(73) Titular: SHELL INTERNATIONALE RESEARCH MAATSCHAPPIJ B.V., Companhia Holandesa. Endereço: Carel Van Bylandtlaan 30, NL- 2596 HR Haia, HOLANDA(NL)

(72) Inventor: ANDREY VICTOROVICH BAKULIN.

Prazo de Validade: 10 (dez) anos contados a partir de 18/12/2018, observadas as condições legais

Expedida em: 18/12/2018

Assinado digitalmente por:
Liane Elizabeth Caldeira Lage
Diretora de Patentes, Programas de Computador e Topografias de Circuitos Integrados

“MÉTODOS PARA MONITORAR ESCOAMENTO DE FLUIDO E PARA PRODUZIR HIDROCARBONETOS ATRAVÉS DE ONDAS ACÚSTICAS”

REFERÊNCIA CRUZADA COM RESPEITO A PEDIDOS CORRELACIONADOS

[0001] O presente pedido reivindica prioridade dos pedidos US No. de Série 61/004.877, depositado em 30 de novembro de 2007, e No. de Série 61/058944, depositado em 5 de junho de 2008, cada um dos quais é incorporado aqui em sua totalidade.

CAMPO DA INVENÇÃO

[0002] As invenções reveladas e ensinadas aqui se referem geralmente ao campo de monitoração de poço subterrânea, e mais especificamente a métodos e sistemas para a monitoração acústica em tempo real de poços concluídos e os arredores de regiões subterrâneas.

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

[0003] Conclusões estão no cerne da produção em águas profundas e constituem uma grande porção dos custos totais do poço. Grande esforço multidisciplinar é investido no projeto das mesmas. Isto contrasta grandemente com o estágio de produção, onde pouca informação é disponível para detectar problemas, otimizar o influxo e prevenir manutenções caras. Tamponamento da peneira de areia, recheio incompletamente, desenvolvimentos de "pontos quentes" em peneiras, desestabilização do recheio anular, migração de partículas finas, dano próximo ao furo de sondagem, fluxo cruzado, esgotamento diferencial, compartimentalização, compactação, representam uma lista típica de desafios que são extremamente difíceis de decifrar com base em somente várias indicações de pressão e temperatura permanentes. Muitos problemas podem ser identificados pelo registro de produção, mas ele é caro e não é feito em tempo real. Sensores de pressão e temperatura permanentes, colocados através da face de areia, podem

prover informação crítica para a diagnose de problemas de conclusão e a indústria de serviço está desenvolvendo ferramentas para tornar tal detecção exeqüível no futuro. Todavia, esses novos dados de temperatura de pressão são improváveis que conduzam à identificação inequívoca dos problemas acima por causa da grande quantidade de parâmetros que caracterizam conclusões complexas e reservatórios que permanecem ilimitados por nossos dados.

[0004] Por exemplo, há um problema de baixo desempenho de poços de produção de hidrocarbonetos no Golfo do México. "Desempenho de poço" absorve problemas de reservatório de grande escala, tais como a compartimentalização bem como alterações na película de poço local com o tempo, que compreende ainda conclusão, perfurações e efeitos próximos ao furo de sondagem. Por conseguinte, múltiplas explicações podem ser dadas ao problema. A compartimentalização aparente e limites em forma de U ubíquos podem ser uma resposta em uma escala de "reservatório". Ainda, aqueles limites são raramente confirmados por dados sísmicos de 4D ou outros dados. O guarnecimento com folhelho é um cenário alternativo em escala de reservatório que pode conduzir ao baixo desempenho. Uma outra explicação em escala de poço sugere que a produtividade de poço declina com o tempo devido à perda do assim chamado produto "kh", onde k e h são permeabilidade e espessura de reservatório, correspondentemente. O modelo de esgotamento diferencial argumenta que esta perda ocorre principalmente devido à redução numa espessura de produção, embora os mecanismos exatos da debilidade de fluxo ainda estejam sendo debatidos. Similarmente, a redução em permeabilidade é uma outra explicação alternativa, embora a quantia desta redução (85-90%) não seja consistente com medições de laboratório. Os esparsos dados existentes de poços podem suportar qualquer um destes cenários, confirmando que o problema está sob restrições. Para distinguir entre esses diferentes cenários, existe uma necessidade de mais

dados de furo abaixo em várias escalas, que possam caracterizar inequivocamente os vários componentes do sistema de produção.

[0005] No contexto de conclusões em águas profundas, há uma ênfase adicional no controle da areia porque se acredita que a gestão da areia produzida a é geralmente uma solução cara e na maioria das vezes não exequível para o Golfo do México, embora possa funcionar bem em outros locais onde está presente alguma cimentação de grão-a-grão. A presença de meios de controle de areia entre o reservatório e o furo de sondagem introduz custo e complexidade adicionais, e requer a gestão apropriada. A meta é uma solução que é suficientemente robusta para controlar a produção de areia pela vida útil do reservatório, evitando prejuízo e a necessidade de qualquer intervenção. Para chegar a um sistema de controle de areia que é menos propenso a problemas, a causa fundamental dos problemas existentes deve ser primeiramente entendida. Uma vez quando as questões forem totalmente compreendidas, a intervenção ou remediação sob demanda pode tornar-se possível. O alto custo de dispositivos de poço em águas profundas (peneira de areia, etc.) e a intervenção podem justificar a presença de ferramentas de vigilância inteligentes que não seriam econômicas em outros ambientes. Em adição, as ferramentas de vigilância preferivelmente precisam durar pela vida útil dum reserva.

SUMÁRIO DA INVENÇÃO

[0006] A presente invenção provê um sistema e método para monitorar dispositivos permeáveis de furo abaixo, tais como peneiras de areia. De acordo com algumas formas de concretização, um método para monitorar escoamento de fluido através de um dispositivo de furo abaixo, compreende a) prover uma onda de tubo acústica no fluido no dispositivo; b) medir a onda de tubo acústica depois de ela ter passado através do fluido no dispositivo; e c) avaliar a permeabilidade do dispositivo pela medição da atenuação do sinal acústico. Alterações em velocidade do sinal acústico podem também ser

medidas.

[0007] O dispositivo pode ser um dispositivo de furo abaixo permeável e a etapa c) pode incluir ainda determinar que o dispositivo esteja pelo menos parcialmente tamponado pela detecção de pelo menos um dentre uma redução em atenuação ou uma redução em perda de velocidade na onda de tubo quando ela passa através do dispositivo.

[0008] O dispositivo pode ser uma peneira de areia; as medições na etapa b) podem ser feitas usando uma pluralidade de sensores distribuídos no furo; e os sensores podem ser sensores de fibra óptica. O método pode incluir ainda uma etapa de correlacionar de forma cruzada um sinal recebido em um primeiro receptor com sinais recebidos em sensores adicionais de modo a obter uma resposta efetiva se o sinal foi emitido a partir de uma fonte em uma posição do primeiro receptor.

[0009] A etapa c) pode incluir ainda determinar que o dispositivo não esteja tamponado pela detecção de que uma onda de tubo rápida passando através do dispositivo é retardada em baixas frequências, mas é acelerada em altas frequências; determinar que o dispositivo não esteja tamponado por medir uma onda rápida e detectar uma atenuação relativamente forte de dita onda rápida em uma faixa de frequência de 350-700 Hz; ou determinar que o dispositivo não esteja tamponado pela detecção de uma onda de tubo lenta que foi transformada em um enchimento complexo com amplitude e velocidade reduzidas. O método pode incluir ainda a etapa de determinar a permeabilidade relativa do dispositivo pela detecção de uma banda de frequência tendo um grau de atenuação relativamente alto e comparar a frequência da banda com aquela de uma banda de frequência tendo um grau de atenuação relativamente alto em uma medição diferente.

[00010] Em outras formas de concretização, a invenção provê um método para produzir hidrocarbonetos a partir de uma formação portando hidrocarboneto, compreendendo produzir hidrocarbonetos através de um

dispositivo de furo abaixo permeável e monitorar o escoamento através do dispositivo usando os métodos descritos aqui. A presente invenção inclui um sistema para monitoração em tempo real de conclusões pela provisão da capacidade de avaliar alterações em permeabilidade que ocorrem na peneira de areia e dispositivos de enchimento de cascalho, bem como perfurações individuais usando ondas acústicas. Ele é complementar a outros métodos de monitoração dentro de poço, tais como aqueles revelados na Patente US No. 6.854.327, que permitem monitorar a integridade estrutural (deformações estáticas) de peneiras de areia e assim compreender a compactação e outras condições relacionadas a esforços.

[00011] O presente método de monitoração acústico pode servir como um monitor permanentemente instalado da qualidade da face de areia. Os métodos de monitoração acústicos conduzem constantemente tanto a verificações ativas da peneira de areia e seu ambiente quanto à monitoração passiva do reservatório. A detecção precoce e diagnósticos apropriados seguem-se como um resultado natural da monitoração permanente, de modo que o tratamento apropriado (recondicionamento) pode ser fornecido depois de os problemas saírem do controle. A monitoração permanente pode também servir como um seguro adicional para salvaguardar conclusão cara e dispositivos de controle de areia, bem como o furo de sondagem propriamente dito. Em adição, os métodos como os descritos aqui podem fornecer correntes de novos dados acerca do que pode melhorar a compreensão de outros problemas de conclusão e peneira de areia e eventualmente contribuir para a resolução adequada de muitos problemas de "baixo desempenho de poço".

[00012] As invenções reveladas e ensinadas aqui são dirigidas aos métodos e aplicações de monitoração acústica em tempo real de conclusões e vedações com cascalho. De acordo com uma primeira forma de concretização da presente exposição, um método para melhorar a recuperação de hidrocarbonetos a partir de uma formação portando hidrocarboneto

empregando fluidos de recuperação é descrito, em que o método compreende monitoração acústica em tempo real da estabilidade e/ou permeabilidade da conclusão. Outras formas de concretização da presente invenção que incluem métodos para produzir hidrocarbonetos a partir de uma formação portando hidrocarboneto enquanto monitora a estabilidade da conclusão peneirada por areia são descritas, em que o método compreende monitoração acústica em tempo real da conclusão usando um modelo acústico durante o processo de produção.

[00013] Em ainda uma outra forma de concretização da presente exposição, métodos para manter as alterações de estabilidade ou permeabilidade de um furo de sondagem durante perfuração ou operações de manutenção de poço, ou durante a produção ou operações de recuperação melhoradas, ou durante conclusões peneiradas por areia. Os presentes métodos que podem incluir usar fluidos introduzidos no furo de sondagem para facilitar as operações são descritos. Ainda, outras formas de concretização dos presentes métodos podem compreender gerar um modelo de monitoração acústica em tempo real; monitorar o furo de sondagem usando ondas de tubo acústicas para monitorar alterações no furo de sondagem; continuar a atualizar o modelo e continuar a ajustar em uma base em tempo real as propriedades dos fluidos, como necessário para manter ou melhorar a permeabilidade de produção durante a operação.

BREVE DESCRIÇÃO DAS VÁRIAS VISTAS DOS DESENHOS

[00014] As seguintes figuras formam parte da presente descrição e são incluídas para demonstrar mais precisamente certos aspectos da presente invenção. A invenção pode ser mais bem entendida pela referência a uma ou mais dessas figuras em combinação com a descrição detalhada de formas de concretização específicas apresentadas aqui.

[00015] A figura 1 ilustra esquematicamente o efeito de permeabilidade

sobre ondas acústicas usando um modelo de um reservatório.

[00016] A figura 2 ilustra esquematicamente uma seção transversal da conclusão peneirada por areia em um furo de sondagem revestido.

[00017] A figura 3 ilustra esquematicamente uma instalação de observação de fluxo experimental para modelar conclusão por peneira de areia em um poço horizontal.

[00018] Embora as invenções reveladas aqui sejam suscetíveis de várias modificações e formas alternativas, somente poucas formas de concretização específicas foram mostradas a título de exemplo nos desenhos e são descritas em detalhe abaixo. As figuras e descrição detalhada destas formas de concretização específicas não são destinadas a limitar a amplitude ou escopo dos conceitos inventivos ou das reivindicações anexas, de nenhuma maneira. Ao contrário, as figuras e descrições detalhadas são providas para ilustrar os conceitos inventivos para uma pessoa de conhecimento comum na arte e permitir que tal pessoa possa reproduzir e usar os conceitos inventivos.

DESCRIÇÃO DETALHADA

[00019] Será entendido que o uso aqui de um termo singular, tal como, mas não limitado a "um" não pretende limitar o número de itens. Também, o uso de termos relacionais, tais como, mas não limitados a "topo", "fundo", "esquerdo", "direito", "superior", "inferior", "abaixo", "acima", "lateral", e similares são usados na descrição para clareza na referência específica às figuras e não pretendem limitar o escopo da invenção ou das reivindicações anexas. Adicionalmente, nesta descrição, os termos "acima" e "abaixo"; "para cima" e "para baixo"; "a montante" e "a jusante"; e outros termos que indicam posições relativas acima ou abaixo de um dado ponto ou elemento são usadas nesta descrição para descrever mais claramente algumas formas de concretização da invenção. Todavia, quando aplicados em aparelhos e métodos para uso em poços que são desviados ou horizontais, tais termos podem se referir a uma esquerda para a direita, direita para esquerda, ou outra

relação, quando apropriado. A discussão de elementos singulares pode incluir elementos plurais e vice-versa.

[00020] Um aspecto da presente invenção é o uso de um sensor, tal como um sensor acústico, em um poço, para monitorar uma operação realizada no poço ou para monitorar vários aspectos de uma ferramenta, ferramenta, sistema, ou dispositivo de furo abaixo. Outros aspectos da invenção incluem o encaminhamento de colocação de linhas de controle e sensor em uma conclusão de controle de areia. A título de exemplo, a presente invenção pode ser usada em um furo de sondagem que penetrou em uma zona subterrânea que inclui uma formação produtiva. O furo de sondagem pode incluir um revestimento que foi cimentado no local. O revestimento pode ter uma pluralidade de perfurações que permitem a comunicação de fluido entre o interior do furo de sondagem e a formação produtiva. Como é conhecido na arte, ferramentas de poço, tais como dispositivos de conclusão de controle de areia, podem ser posicionadas dentro do revestimento adjacente à formação produtiva, que deve ser cheio com cascalho.

[00021] Quando usado aqui, o termo o "peneira" refere-se a peneiras com envoltório de arame, peneiras do tipo mecânico e outros mecanismos de filtração tipicamente empregados com peneiras de areia. Peneiras geralmente têm um tubo de base perfurado com um meio de filtro (por exemplo, recheio por fios metálicos, material de malha, "pre-packs", camadas múltiplas, malha tecida, malha sinterizada, material de folha, folha fendida envolvente, folha perfurada envolvente, MESHRITE fabricada por Schlumberger, ou uma combinação de qualquer destes meios para criar um meio de filtro compósito e similar) disposto sobre o mesmo para prover a filtração necessária. O meio de filtro pode ser feito em qualquer maneira conhecida (por exemplo, corte a laser, corte por jato d'água e muitos outros métodos). As peneiras de areia precisam ter aberturas suficientemente pequenas para restringir o fluxo de cascalho, frequentemente tendo interstícios na faixa de malha de 60-120, mas

outros tamanhos podem ser usados. O elemento de peneira pode ser referido como uma peneira, peneira de areia, ou uma peneira de enchimento de cascalho. Muitos dos tipos de peneira comuns incluem um espaçador que desloca o membro de peneira a partir de uma tubulação de base perfurada, ou tubo de base, que o membro de peneira circunda. O espaçador provê um espaço anular de escoamento de fluido entre o membro de peneira e a tubulação de base. Peneiras de vários tipos são comumente conhecidas para aqueles especializados na arte. Note que outros tipos de peneiras serão discutidos na seguinte descrição. Também, é entendido que o uso de outros tipos de tubos de base, por exemplo, tubo fendido, permanece dentro do escopo da presente invenção. Em adição, algumas peneiras têm tubos de base que não são perfurados ao longo de seu comprimento ou de uma porção dos mesmos para prover o encaminhamento de fluido de várias maneiras e por outras razões.

[00022] As depositantes criaram métodos e sistemas altamente eficazes para a monitoração acústica em tempo real de conclusões peneiradas por areia usando ondas acústicas. Estes métodos e sistemas podem ser usados para monitorar uma variedade de variáveis em um furo de sondagem completado, incluindo permeabilidade e alterações em permeabilidade através da região subterrânea completada.

[00023] A figura 1 é uma ilustração esquemática de um furo de sondagem aberto 10 passando através de uma formação impermeável 20 em que está presente uma camada 30 de um material permeável poroso cheio com fluido, que é um ambiente típico para perfilagem acústica a cabo. Dentro deste ambiente, um tubo ou onda de Stoneley 12 é um modo simétrico ao eixo fundamental que existe desde a frequência zero. Em baixas frequências, ele representa um movimento do tipo de pistão da coluna de fluido e domina a propagação de onda. Quando a velocidade de cisalhamento da formação é maior que a velocidade de fluido ("formação rápida"), como em uma

formação impermeável, a onda de tubo é completamente aprisionada- um modo que não se atenua em formações impermeáveis. Quando a onda de tubo encontra uma região impermeável, tal como 30, ela diminui de velocidade e se atenua por causa da comunicação de fluido que ocorre entre a formação e o furo de sondagem. Esta comunicação conduz a uma perda de energia na forma de escapamento de ondas de Biot lentas dentro da formação. A modelação prediz que, em baixas frequências, a velocidade de onda de tubo diminuirá e atenuação aumentará com crescente mobilidade de fluido (permeabilidade/viscosidade). Estas predições foram validadas no laboratório e tornaram-se um fundamento para uma técnica "direta" e contínua de estimar permeabilidade no local a partir de perfis a cabo. A presença de torta de lama restringe a comunicação de fluido e torna as assinaturas de onda de tubo menos sensíveis à permeabilidade de formação. No caso limítrofe de uma torta de lama dura, as pressões de fluido no furo de sondagem e na formação tornam-se completamente irrelevantes; as ondas de tubo não sofrem nenhuma atenuação e diminuem de velocidade e se propagam da mesma maneira como se propagariam se o poço fosse circundado por uma formação impermeável.

[00024] Em adição ao efeito da permeabilidade da formação circundante sobre as ondas de tubo, limites entre formações com diferentes permeabilidades também causam ondas de tubo refletidas. Quando o efeito de uma alteração em permeabilidade é simulado usando um modelo simples de um reservatório permeável embutido entre dois semi-espacos impermeáveis, pode ser visto que alguma reflexão existe devida à desadaptação das velocidades de onda de tubo entre a camada e os semi-espacos. Aumentos em permeabilidade de camada na simulação conduzem a um aumento dramático em refletividade de onda de tubo, especialmente em baixas frequências. A refletividade adicionada é devida à comunicação de fluido aumentada; uma formação mais permeável causa uma maior redução em velocidade de onda de tubo dentro da camada e, por conseguinte, maior contraste em

propriedades que controlam a reflexão. Se a comunicação de fluido for terminada (por exemplo, torta de lama dura) então todas as respostas colapsam abaixo da curva preta que corresponde ao caso elástico impermeável. Isto destaca o fato de que as assinaturas de onda de tubo são somente afetadas quando comunicação de fluido está presente. For uma comunicação de fluido parcial, respostas cairiam entre soluções elásticas impermeáveis e correspondentes soluções poro-elásticas de fluxo aberto.

[00025] Descobrimos que as ondas de tubo são capazes de testar instantaneamente a presença ou ausência de comunicação de fluido através da parede de furo de sondagem dentro de uma camada particular. Se a comunicação de fluido é ausente devido à torta de lama presente ou falta de permeabilidade de formação, então a redução ou atenuação de velocidade é observada. Se comunicação de fluido está presente, então redução e atenuação de velocidade são observadas. Similarmente, em uma configuração de reflexão, a comunicação de fluido aumentada conduz a uma maior reflexão. Nas próximas seções, ilustramos a aplicação desses princípios a furos de poço completados e revestidos com conclusões peneiradas por areia.

Furos de Poço Revestidos e Completados

[00026] Um poço revestido e completado tem várias camadas entre a formação e o fluido de furo de sondagem. Como mostrado na figura 2, em um modelo simplificado de uma conclusão revestida peneirada por areia, as seguintes camadas cilíndricas concêntricas estão tipicamente presentes: furo de sondagem cheio de fluido 10, peneira de areia 14, areia com cascalho 16, revestimento 18, e formação 22. Uma pluralidade de perfurações 24 no revestimento atua como canais de comunicação, conectando o furo de sondagem 10 à formação 22 através do revestimento 18. Em conclusões de furo aberto, o revestimento e perfurações estão ausentes e fluido de formação se comunica diretamente com o furo de sondagem através do enchimento de cascalho e peneira de areia. A peneira de areia e o enchimento de cascalho

previnem a migração de areia de reservatório no furo de sondagem bem como mantêm a estrutura do reservatório em torno do furo de sondagem.

[00027] Este modelo mais complexo de um poço completado tem uma similaridade essencial com o modelo simples de furo aberto, mais especificamente em um poço em escoamento existirá comunicação de fluido através de todas as camadas da conclusão. A falta de comunicação de fluido em qualquer camada intermediária (peneira ou perfurações) alterará o fluxo ou escoamento do fluido de reservatório no furo de sondagem.

[00028] Como discutido abaixo, descobrimos que comunicação de fluido reduzida ou através da peneira de areia ou de perfurações tem um efeito mensurável sobre as assinaturas das ondas de tubo passando através da porção relevante do furo de sondagem. Assim, os presentes sistemas e métodos podem ser usados para monitorar se dispositivos de furo abaixo permeáveis, incluindo, mas não limitados a peneiras de areia e revestimentos perfurados, estão permitindo o nível de fluxo esperado, ou estão parcialmente ou completamente tamponados. Desde que sensores suficientes estejam no local para prover a resolução necessária, os presentes sistemas e métodos podem ser usados para localizar e quantificar a extensão de obturação de um dispositivo de furo abaixo permeável. Ainda adicionalmente, descobrimos que os presentes sistemas e técnicas podem ser usados para monitorar sistemas dinâmicos, nos quais a vazão e o padrão de escoamento de fluido estão se modificando, tais como um processo de preenchimento de cascalho.

[00029] Existem distinções acústicas significantes entre conclusões de furo aberto e peneiradas por areia: a) a primeira tem camadas sólidas adicionais de peneira de areia ou revestimento (ambos feitos de aço); b) somente uma única camada poro-elástica e uma única interface estão presentes no modelo de furo aberto, enquanto que na conclusão peneirada por areia existem múltiplas camadas poro-elásticas (revestimento perfurado, formação, areia com cascalho, peneira de areia) e interfaces poro-elásticas

múltiplas entre elas; c) areia com cascalho e peneira de areia são muito diferentes das rochas de reservatório na medida em que elas são muito permeáveis (permeabilidade $> 100 \mu\text{m}^2$); e areia com cascalho tem velocidade de cisalhamento muito baixa ($<100 \text{ m/s}$).

[00030] Os efeitos de revestimento e peneira de areia (impermeável) podem ser parcialmente entendidos de estudos de propagação de onda na produção de poços com tubulação e revestimento ou furos abertos com tubulação de perfuração. Em ambos os casos, o tubo interno e o espaço anular são cheio com o mesmo fluido ou com um fluido diferentes. Uma distinção-chave entre esses modelos análogos e a conclusão de peneira de areia é a seguinte: tubagem, tubulação de perfuração e revestimento são completamente impermeáveis, enquanto que a peneira de areia, areia com cascalho e revestimento são altamente permeáveis, e, no caso normal, são abertos para escoar; e, o espaço anular é cheio com fluido tendo nenhuma rigidez ao cisalhamento, enquanto a areia com cascalho a conclusão peneirada por areia é provável que tenha alguma pequena rigidez ao cisalhamento. .

[00031] Existem duas técnicas conhecidas que utilizam as ondas de tubo na produção de furos de poço revestidos e perfurados para monitorar a fraturação hidráulica. A primeira técnica compreende o uso de "perfis de reflexão de tubo-onda". Ela analisa a intensidade das reflexões de tubo-onda ao longo de um intervalo perfurado que foi hidraulicamente fraturado. Pela execução de perfilagem de reflexão de tubo-onda em frequências de ~ 300 - 3000 Hz depois da estimulação, pode-se avaliar a qualidade de fratura hidráulica ao longo do intervalo perfurado. A segunda técnica, "teste de impedância hidráulica", consiste em pulsar periodicamente um poço de estimulação com frequência muito baixa das ondas de tubo ($<10 \text{ Hz}$) e observando as alterações em várias assinaturas de sinais refletidos para estimar o tempo de abertura e os parâmetros de uma fratura hidráulica detrás de um revestimento perfurado. Na primeira técnica, uma fonte e um receptor

são colocados no furo de sondagem, próximos à fratura e, por conseguinte, reflexões de alta frequência podem resolver as propriedades de fluxo dos intervalos verticais individuais de alguns poucos metros. Na segunda técnica, o sinal é enviado e recebido a partir do cabeçote de poço com o resultado que somente frequências muito baixas podem ser registradas. Como uma consequência, esta técnica tem deficiente resolução vertical e somente propriedades médias de toda a fratura podem ser avaliadas. Não obstante, ambas as técnicas ilustram o uso das ondas de tubo para detectar o aumento na comunicação de fluido entre furo de sondagem e formação, causada pela abertura de uma fratura hidráulica.

[00032] Técnicas não são atualmente conhecidas para monitorar o ambiente de conclusão composto tanto de componentes feitos pelo homem (peneira, revestimento, areia com cascalho) quanto componentes naturais (formação), a permeabilidade dos quais precisa ser monitorada ao longo do tempo. Na discussão abaixo, focamos sobre experimento de laboratório que simula conclusões realísticas e comparamos os resultados com modelação analítica e numérica.

Instalação de Laboratório com um Modelo de Poço Horizontal

[00033] A figura 3 representa os esquemas de uma instalação de enlace de fluxo horizontal usado para medições experimentais. Em uma instalação experimental, o tubo externo (revestimento 18) de ~ 9 m (30 ft) de comprimento consistiu de seis seções de 1,5 m unidas conjuntamente e afixadas ao trilho de suporte subjacente. O tubo interno (peneira de areia 14) foi posicionado internamente usando centralizadores de plástico. Uma fonte 32 e uma pluralidade de sensores 34 foram posicionadas dentro do tubo interno.

[00034] Será entendido que os conceitos da presente invenção são aplicáveis a sistemas em que os sensores são distribuídos sobre um cabo ou

são permanentemente colocados no furo. Apenas a título de exemplo, os sensores poderiam ser embutidos na conclusão propriamente dita, montados em quaisquer das tubulações de furo abaixo, ou incluídos na forma de sensores distribuídos (que podem ser sensores de fibra óptica) que são envoltos em torno de uma ou mais das tubulações ou dispositivos de furo abaixo.

[00035] Igualmente, a fonte 32 pode compreender qualquer fonte apropriada, ou uma pluralidade de fontes, e pode ser abaixada no furo ou distribuídas permanentemente no furo. Ainda, como discutido abaixo, a fonte pode ser uma fonte efetiva, e pode estar fora do furo, desde que ela seja acusticamente acoplada ao fluido na região de interesse.

[00036] O espaço anular entre o tubo interno e o tubo externo pode ser cheio ou com água ou com areia com cascalho saturada com água. Medições foram conduzidas com um arranjo de hidrofone e uma fonte piezelétrica situando-se no fundo do tubo interno. A fonte excitou uma forma de onda impulsiva de banda larga com frequência dominante controlada. Vinte e quatro sensores de hidrofone com espaçamento de 35 cm registraram o campo de onda resultante. Para reduzir ruído de fundo (formação/condicionamento de ar), o empilhamento de múltiplos registros foi usado.

[00037] Tentamos distinguir entre quatro cenários de conclusão (Tabela 1) usando assinaturas de onda de tubo. "Aberta" e "fechada" denotam dois casos extremos de presença ou ausência de comunicação de fluido total. Comunicação de fluido "parcial" deve manifestar-se propriamente com assinaturas intermediárias entre esses dois limites. As assinaturas examinadas incluem velocidade de propagação e atenuação das ondas de tubo bem como amplitudes de transmissão e reflexão a partir de interfaces tais como em 28, onde meios de contatação são descritos por diferentes

cenários.

Tabela 1

Cenários de Conclusão

	Peneira	Perfurações
Cenário 1	Aberta	Fechada
Cenário 2	Fechada	Fechada
Cenário 3	Aberta	Aberta
Cenário 4	Fechada	Aberta

[00038] Na presente exposição apresentamos medições experimentais para os cenários 1 e 2 na ausência de areia com cascalho e comparamos as mesmas com a modelação. Na última seção apresentamos a modelação numérica de conclusões tamponadas por cascalho para os dois primeiros cenários.

[00039] A propagação de onda em um Modelo de Conclusão Simplificado como em Instalação de Laboratório (Sem preenchimento de cascalho).

[00040] Apresentamos aqui um modelo simples que descreve a propagação de onda na Instalação de Laboratório. Este modelo precisa somente de uma menor modificação para ser aplicável ao ambiente real no local. As peneiras de areia atuais podem ser bastante complicadas, mas começamos com a assunção que a peneira é representada por um tubo efetivo homogêneo tanto em termos de propriedades mecânicas quanto hidráulicas. Se este tubo não for permeável (isto é, está presente uma peneira tamponada), então instalação de laboratório pode ser simplificada para este modelo de quatro camadas: 1) fluido; 2) tubo interno elástico (peneira); 3) fluido; 4) tubo externo elástico (revestimento). Este modelo de dois tubos elásticos concêntricos com um limite externo livre (ar) suporta quatro modos de onda simétricos ao eixo em baixas frequências:

- TI - onda de tubo suportada pelo tubo interno
- TO - onda de tubo suportada pelo tubo externo
- PI – onda do tipo de placa ou revestimento relacionada ao

tubo interno

- PO - onda do tipo de placa relacionada ao tubo externo

[00041] O Apêndice ao Pedido US No. de Série 61/004.877, que é incorporado aqui para referência, descreve a natureza geral desses modos e explica de que maneira a velocidade desses modos pode depender dos parâmetros de conclusão. Será entendido, todavia, que os modos e o processamento dos sinais resultantes podem ser realizados usando qualquer de um número de técnicas matemáticas que são conhecidas para aqueles especializados na arte.

[00042] Usando as técnicas descritas no Apêndice, realizamos análise empírica e modelação para determinar a eficácia dos conceitos reivindicados aqui. Sismogramas de pressão exemplificativos para um modelo de quatro camadas com poros fechados (nenhum enchimento de cascalho) a partir de fonte monopolo com amplificações sucessivas, com a frequência central de fonte igual a 1000 Hz, mostraram que (a) a chegada maior é uma onda de tubo rápida (TO - 1030 m/s) relacionada ao tubo externo rígido, (b) a chegada menor é uma onda de tubo lenta (TI - 270 m/s) relacionada ao tubo interno mais macio, e (c) ondas de placa são de amplitude ainda menor (PO - 5410 m/s, PI - 1630 m/s). A onda de tubo rápida foi menos atenuada na ausência de uma peneira, um pouco atenuada em poros fechados e substancialmente absorvida em poros abertos. Sismogramas sintéticos para um modelo de quatro camadas exemplificativo foram computados usando um código de diferença finita. Nestes modelos, a chegada dominante foi verificada ser uma onda de tubo rápida associada com o tubo externo (TO), enquanto que a onda de tubo lenta suportada pelo tubo interno (TI) foi mais fraca e as ondas de placa poderiam somente ser vistas com amplificação substancial. Velocidades de onda de placa foram verificadas ser quase que independentes de frequência; as ondas de tubo rápidas são ligeiramente dispersivas, enquanto que as ondas de tubo lentas sofrem dispersão moderada. Se formação é acrescentada fora do revestimento, então a onda de placa externa (PO)

desaparece. Se o espaço anular entre o revestimento e a peneira é cheio com areia, então está presente somente uma onda de tubo e uma onda de placa associadas com a estrutura compósita da conclusão. Assim, a presença de duas ondas de tubo pode ser usada como um diagnóstico para uma conclusão sem um enchimento de cascalho (ou enchimento de cascalho fluidizado). As propriedades das ondas de tubo em uma conclusão empacotada com cascalho são examinadas abaixo.

[00043] Se o tubo interno tornar-se permeável (como na peneira de areia que é aberta para fluir), então o mesmo número de modos de onda permanece, mas suas velocidades e atenuação são alteradas. Falando simplesmente, ambas as ondas de tubo sofrem atenuação e uma redução em velocidade.

[00044] Em nossa modelação, peneiras de areia abertas ao fluxo foram modeladas como um tubo homogêneo feito de material Biot poro-elástico efetivo. A utilização da teoria de meio efetivo pode não ser completamente justificada, uma vez que micro elementos, tais como perfurações ou fendas em um tubo de base são das mesmas dimensões que a espessura de tubo. Não obstante, os dados sugerem que as ondas de tubo com comprimento de onda de vários metros "vêm" a peneira como um tubo efetivo e justificam o uso de um modelo simples para a compreensão do efeito de alterações de permeabilidade em assinaturas de onda de tubo. Assim, a permeabilidade radial das peneiras experimentais foi estimada usando um modelo analítico simples com um arranjo de fendas ou faturas paralelas.

[00045] Nos casos quando as perfurações estão fechadas (cenários 1 e 2), o limite externo é considerado como um tubo impermeável com um limite externo sem tração. A obturação completa (cenário 2) foi modelada como uma condição de limite sem fluxo entre a peneira e os fluidos circundantes.

Conclusão sem Enchimento de Cascalho: Experimento vs. Modelação

[00046] Experimentos foram conduzidos com um tubo externo de vidro e

um tubo interno de PVC. Para modelar uma peneira de areia aberta ("poros abertos") usamos um tubo de PVC com fendas de 0,0002 m (0,008"). a peneira de areia tamponada foi modelada com uma peça bruta de tubo de PVC sem fendas e é algumas vezes também referida como "poros fechados".

A. *Assinaturas de transmissão.*

[00047] Voltando primeiramente para assinaturas de transmissão - velocidade e atenuação - na presença de peneiras abertas e tamponadas, comparamos campos de onda gravados ou registrados no caso de nenhuma peneira e peneira com poros "abertos" e "fechados". Na ausência de uma peneira, encontramos que existe somente uma onda de tubo (rápida) com velocidade de em torno de 1050 m/s. ela sofre alguma perda de amplitude, possivelmente devido à atenuação intrínseca no vidro bem como no espesso cabo de registro. Quando um tubo interno impermeável é acrescentado (poros fechados), uma onda de tubo lenta aparece, enquanto que a onda rápida começa a ficar ligeiramente mais atenuada devido à alta absorção no PVC. Com um tubo interno fendido, fluido se comunica através da peneira de PVC, o que causa uma atenuação relativamente forte de ambas as ondas de tubo. Quando usado aqui, o termo "atenuação relativamente forte" refere-se à atenuação que é maior que a atenuação sofrida pela onda rápida deslocando-se através de um meio que é conhecido ser relativamente impermeável, em comparação com a conclusão ou região de interesse. A filtração mediana pode separar onda rápida e onda lenta e revelar a presença de reflexões múltiplas de cada onda nas juntas entre os segmentos de tubo de 1,5 m. Encontramos que a onda lenta estava ausente sem uma peneira, presente em uma peneira com poros fechados e mais atenuada e mais lenta em poros abertos. Assim, concluímos que atenuação grandemente aumentada tanto das ondas de tubo rápidas quanto das lentas é o diagnóstico de primeira ordem para peneiras abertas ("poros abertos"), enquanto que atenuação reduzida é característica para peneiras tamponadas ("poros fechados").

[00048] Quando é determinado que toda ou uma porção de uma conclusão é tamponada, pode ser desejável ajustar as propriedades de fluidos no furo de sondagem de modo a reduzir ou eliminar a obstrução. Isto pode ser efetuado, por meio do, por exemplo, ajuste da pressão de empuxe para baixo, pulsagem da pressão, modificação da composição de fluido, ou outras técnicas como são conhecidas na arte.

[00049] Diagnósticos adicionais podem ser estabelecidos pela análise da distribuição de energia como uma função de frequência entre esses dois casos. Uma vez que os dados experimentais são complicados pela presença de reflexões adicionais nas juntas de tubo, esta análise é preferivelmente realizada usando espectros de frequência-lentidão. Espectros de frequência-lentidão para os sismogramas sintéticos mostram que a onda de tubo rápida domina o espectro. Para o caso fechado, a onda de tubo lenta foi bem vista, com um pico se alargando em direção às frequências inferiores indicando dispersão. Na presença de fendas abertas, a onda rápida sofre forte atenuação que é particularmente anômala na faixa de frequência de meio (350-700 Hz).

[00050] Em um traçado do espectro de velocidade média sobre a faixa de frequência inteira, tanto as ondas de tubo rápidas quanto as lentas com aproximadamente as mesmas velocidades de 350 m/s e 1100 m/s estavam presentes nos casos tamponado e aberto, mas a onda lenta estava completamente ausente sem uma peneira. Em uma peneira tamponada, a onda rápida transportou uma energia máxima em uma faixa de frequência de 300-600 Hz, perto da frequência dominante da fonte, enquanto que frequências inferiores e superiores transportaram menos energia.

[00051] Em contraste, o espectro da onda rápida em uma peneira aberta tinha um grande "furo" de energia entre 300 e 600 Hz onde rapidamente a onda foi atenuada tão fortemente que até mesmo frequências mais altas (600-900 Hz) transportaram mais energia. Tal como para a onda de tubo lenta, ele principalmente existiu em frequências abaixo de 600 Hz e foi também

atenuado. Surpreendentemente, sua amplitude aumentou em baixas frequências para poros abertos, onde ela foi maior que a amplitude da onda rápida.

[00052] Este comportamento experimental foi então comparado com os resultados preditos usando modelação numérica. Um traçado de curvas de dispersão teórica para o caso de poros fechados revela que a onda de tubo rápida sofre pequena dispersão abaixo de 2000 Hz e coincide com os valores experimentalmente observados. Sismogramas de pressão sintéticos, computados para poros fechados e abertos em uma instalação experimental usando um método de refletividade mostram que, em poros abertos, as ondas de tubo lentas se transformam em um pacote de energia mais complicado com velocidades mais baixas e um padrão de "degrau de escada". Linhas desenhadas que conectam a quebra na fase têm inclinações próximas à velocidade de onda P no material de peneira poros. O aumento do diâmetro do tubo interno impermeável é esperado para resultar em uma redução da segunda velocidade de onda de tubo de 350 para 280 m/s. Enquanto para poros fechados a velocidade lenta seja bem coincidente, para poros abertos a velocidade é mais alta que a prevista. Mais provavelmente isto é o resultado da variação nas propriedades elásticas do PVC usado para a fabricação do tubo bruto e da peneira fendida. Sismogramas sintéticos foram computados para uma instalação de vidro com nossa melhor estimativa dos parâmetros poro-elásticos de nossa instalação experimental. Tal como no caso dos resultados experimentais, no caso de poros fechados observamos duas ondas de tubo, com a onda de tubo rápida dominando em amplitude. Na presença de uma peneira com fendas abertas, ambas as ondas sofreram fortes alterações. A onda de tubo rápida sofreu atenuação moderada e alteração de forma de onda. A onda de tubo lenta foi transformada em um enchimento complexo com fraca amplitude, ao invés de velocidades lentas e um caráter muito estranho. Pela conexão dos pontos onde as alterações de fase dentro do enchimento,

derivamos uma aproximação da velocidade de propagação da onda de Biot lenta no material de peneira poroso (~ 80 m/s). Uma vez que a frequência central da fonte (500 Hz) foi muito mais alta que a frequência de Biot crítica (30 Hz), a interferência com a onda de Biot lenta na peneira porosa pode ser uma razão de um pacote de onda complicado.

[00053] Sem limitar o escopo da invenção de nenhuma maneira, a seguinte interpretação física é sugerida para os resultados modelados. Uma onda de tubo é criada quando o movimento do tipo de pistão do fluido dentro do tubo cria uma expansão radial que é resistida pelo tubo elástico. A onda lenta é principalmente suportada pelo tubo interno. Quando este tubo é fendido, o movimento radial do fluido não é mais resistido, pois líquido pode livremente escapar para o espaço anular, conduzindo assim a uma forte atenuação desta onda. Em contraste, a onda rápida é principalmente suportada pelo tubo sólido de vidro externo. Quando o tubo interno é permeável, o movimento do tipo de pistão do fluido na onda rápida pode adicionalmente trocar o fluido entre as colunas de fluido externa e interna, criando assim uma atenuação moderada.

[00054] Traçados de espectros de frequência-lentidão para poros abertos mostram que, de forma similar aos resultados experimentais, a onda rápida sofre atenuação de uma maneira anômala alta na faixa de frequência média de 350-700 Hz. Em adição, velocidade é reduzida em baixas frequências e o pico de energia torna-se mais largo, indicando dispersão. Traçados de distribuição de energia (esquerda) e velocidade de pico (direita) para a onda de tubo rápida nos dados sintéticos confirmam que a onda de tubo rápida em uma peneira aberta é retardada em baixas frequências, mas sofre ligeira aceleração em altas frequências. A comparação dos traçados confirma a concordância qualitativa entre experimento e modelação: em ambos os casos, a onda rápida exhibe diminuição de amplitude anômala na faixa de frequência de meio, enquanto preserva suas frequências mais altas e mais baixas. Esta diminuição

de amplitude não pode ser explicada pelos espectros da pequena onda de fonte e, por conseguinte, deve ser atribuída à atenuação anômala causada pelo movimento de fluido através da peneira porosa fendida.

[00055] Uma faixa de frequência que exhibe atenuação de frequência é controlada por permeabilidade. Por exemplo, quando a permeabilidade diminui para 50 D, esta banda se move de 350-700 Hz para 600-1000 Hz, isto é, quanto mais baixa a permeabilidade, tanto mais alta é a frequência da banda com atenuação anômala da onda rápida. Isto é também consistente com dados experimentais, uma vez que peneiras tamponadas ($0 \mu\text{m}^2$) não exibem atenuação anômala porque a banda atenuada estará em frequências muito altas ou infinitas. Por conseguinte, a frequência central da banda com atenuação anômala da onda de tubo rápida pode ser usada como um diagnóstico robusto adicional da permeabilidade de peneira. Devemos notar que, em ambos os casos, a frequência central da fonte é preferivelmente muito mais alta que a frequência de Biot crítica para a peneira. Permanece inexplicada a razão pela qual em poros abertos a modelação prediz, ao invés de forte dissipação, características não usuais e forte retardo da onda de tubo lenta, enquanto que os experimentos mostram que a onda lenta é simples e de amplitude comparável com relação à onda rápida, em baixas frequências.

[00056] A diferença em velocidade e atenuação entre conclusões com peneiras abertas e tamponadas também conduz a reflexões nos limites onde as propriedades se alteram. Os seguintes parágrafos discutem transmissão-reflexão em uma única interface entre seções aberta e tamponada de a peneira.

Interface tamponada-aberta.

[00057] Primeiramente, usamos um modelo experimental em que 2/3 do comprimento de tubo compreendem um tubo bruto (poros fechados), e o restante 1/3 composto uma peneira fendida. Em baixas frequências, uma fonte posicionada no centro do tubo bruto excita tanto ondas rápidas quanto lentas. A onda rápida é altamente atenuada ao atingir a interface, por exemplo, em 28

na figura 3. A onda lenta sofre forte reflexão, a qual é mais facilmente vista no exibidor separado de campo de onda. Em frequências mais altas, as reflexões de onda rápida se tornam mais observáveis. A modelação mostra comportamento qualitativamente similar. Primeiro, a onda rápida se torna mais atenuada na seção aberta. Segundo, embora observemos tanto reflexões rápidas-rápidas quanto lentas-lentas, a última é substancialmente maior em amplitude, que é consistente com os dados experimentais. Como acima, é observado que a modelação subestima a amplitude da onda lenta em poros abertos.

Interface aberta-tamponada

[00058] Quando a fonte está dentro da seção aberta, então a propagação de onda se altera. Primeiro, em baixas frequências, a onda de tubo lenta (~ 300m/s) que domina a propagação de onda na seção aberta se converte efetivamente em uma onda rápida (~ 1000 m/s) na seção tamponada. A interferência entre ondas rápidas e lentas fortemente atenuadas cria a impressão de um movimento encurvado em torno da fonte, todavia é claro que a onda rápida é criada por uma onda lenta direta que chega atrasada. Uma inspeção simples de coleta não processada revela o local da interface aberta-tamponada como a alteração na inclinação dos eventos dominantes. Segundo, a mesma onda lenta incidente gera uma forte reflexão de volta para dentro da seção aberta que é claramente maior que a reflexão anterior a partir de uma junta de tubo. Terceiro, em frequências mais altas, observamos uma onda rápida direta a partir da fonte, que rapidamente se é rapidamente atenuada na seção aberta, mas convertida para uma onda rápida que sofre menos atenuação na seção fechada. Não obstante, uma onda rápida mais forte que vai para a direita é criada pela conversão a partir de uma onda de tubo lenta posterior.

Conclusão com um Preenchimento de cascalho - Modelação

Numérica

[00059] A fim de compreender a influência de areia com cascalho sobre a propagação de onda, é importante predizer apropriadamente o módulo de cisalhamento da areia. Existem dois cenários possíveis:

- Se o módulo de cisalhamento é pequeno, mas não desvanecente, o enchimento de cascalho é similar a uma camada de um fraco material fraco. Neste caso, a conclusão se comporta como um meio circundante compósito poro-elástica (radialmente estratificada) consistindo de uma peneira de areia, areia com cascalho, e revestimento – todos com uma rigidez de cisalhamento que não é igual a zero. Se todas as camadas forem elasticamente ligadas, somente uma única onda de tubo existe.

- Se o módulo de cisalhamento de areia é zero, o cascalho atua como uma suspensão e seu comportamento é similar to um efetivo fluido de alta densidade, mas complicado pela porosidade e permeabilidade finitas. Mais que uma onda de tubo seria observada neste caso, tornando-a similar ao caso de uma conclusão sem um enchimento de cascalho.

[00060] Com base em nossos estudos, acredita-se que no caso normal de vedações de cascalho de boa qualidade, o primeiro cenário tem lugar. Isto é confirmado pela inspeção visual de procedimentos de enchimentos de cascalho no laboratório: uma vez que as partículas de areia são acondicionadas, elas não se movem com o fluxo e permanecem "travadas" no local. Isto é indicativo de contato grão-com-grão e rigidez de cisalhamento não desvanecente. O segundo cenário pode ocorrer no caso de areia fluidizada quando o fluxo desestabiliza o enchimento de cascalho e o contato de grão-com-grão não mais tem lugar. Na seguinte discussão, concentramo-nos no primeiro cenário "normal" quando o enchimento de cascalho é modelado como uma camada de meio Biot poro-elástico. A velocidade de onda de cisalhamento permanece o parâmetro mais incerto. Para a modelação inicial, tomamos um valor de 70 m/s que está situado entre as estimativas no local de ~ 120-150 m/s e estimativas de laboratório de ~10-20 m/s.

[00061] Na próxima seção, analisamos a propagação de onda no modelo que descreve a instalação de alumínio de laboratório que seria usada para um experimento atual com um enchimento de cascalho no futuro. Assim, examinamos um modelo de quatro camadas com um limite externo livre consistindo de: 1) fluido; 2) tubo interno elástico (peneira); 3) areia; e 4) tubo externo elástico (revestimento). Assinaturas de transmissão.

[00062] Se a natureza poro-elástica da areia e a peneira forem desprezadas e forem modeladas como meio impermeável elástico, então somente dois modos simétricos ao eixo se propagam em baixas frequências:

- T - onda de tubo suportada pelo tubo compósito consistindo de peneira, areia e revestimento;
- P - onda do tipo de placa ou revestimento, suportada pelo tubo compósito.

[00063] Assim, uma conclusão cheia de cascalho tem metade dos muitos modos como uma conclusão sem enchimento de cascalho. Isto simplifica grandemente a propagação de onda. Uma onda de tubo compósita está mais próxima em caráter à onda de tubo rápida e mantém até mesmo uma velocidade similar de ~ 1100 m/s. Quando a areia se torna fluidizada, então uma segunda onda de tubo (lenta) emerge, que é similar ao caso de uma conclusão sem um enchimento de cascalho. Por conseguinte, a presença de segunda onda de tubo lenta é um diagnóstico de conclusões com areia fluidizada ou falta de areia. A onda de placa tem uma velocidade drasticamente inferior e se torna fortemente dispersiva devido às propriedades elásticas altamente contrastantes das camadas de conclusão.

[00064] Finalmente, deve ser notado que modos simétricos ao eixo adicionais aparecem em frequências mais altas. Frequências de corte do modo de ordem mais alta diminuem com velocidade de cisalhamento decrescente da areia. Como um resultado, uma velocidade de cisalhamento muito baixa da areia pode criar uma propagação de onda multi-modo complexa.

[00065] Sismogramas sintéticos mostram que a onda de tubo domina a propagação de onda em baixas frequências, enquanto a onda de placa pode somente ser vista com alta amplificação. Na seção tamponada da peneira (poros fechados), a onda de tubo tem uma velocidade mais alta e sofre muito pouca atenuação, como esperado. Em contraste, os poros abertos permitem a comunicação de fluido entre a coluna de líquido dentro da peneira e fluido de poro na areia. Como um resultado, observamos uma forte dispersão e uma redução em velocidade bem como substancial atenuação mesmo em deslocamentos muito breves. Assim, similarmente aos métodos de perfilação de furo aberto, podemos distinguir seções permeáveis e impermeáveis de uma peneira pelo exame de velocidade e atenuação. A redução em velocidade e alta atenuação são diagnósticos simples de uma seção aberta, enquanto que a aceleração e pouca ou nenhuma atenuação são características de uma seção tamponada.

Assinaturas de reflexão

[00066] Os sismogramas sintéticos também ilustram o processo de reflexão-transmissão na interface tamponado-aberto e aberto-tamponado. A propagação de onda é simplificada em comparação com o caso de nenhum enchimento de cascalho, uma vez que somente uma única onda de tubo está presente nas seções aberta e tamponada. A onda de tubo refletida é devida à diferença em velocidades e atenuações através da interface. De forma interessante, no modelo, a onda refletida a partir da interface fechada-aberta é muito grande (em torno de 35%), enquanto que a onda refletida a partir da interface aberta-tamponada é mais fraca (em torno de 5%). Está tentando usar aproximação de número de onda efetivo ID para obter uma visão com relação às características do processo de reflexão-transmissão. Embora esta proposta tenha sido validada para meios poro-elásticos e meios elásticos radialmente heterogêneos, sua validade para meios poro-elásticos estratificados radialmente ainda não foi estabelecida. Não obstante, usando a assunção de

ID, a aproximação de número de onda efetivo prediz que os coeficientes de reflexão nas interfaces tamponadas-abertas e abertas-tamponadas devem ser da mesma magnitude e sinais opostos, o que contradiz a modelação por diferença finita.

Dispositivos de Fibra Óptica

[00067] Como discutido acima, experimentos e modelação de laboratório comprovam o conceito do uso de sinais de onda-tubo para monitorar alterações de permeabilidade ao longo da conclusão. Todavia, a fim de implementar esta técnica de furo abaixo, é necessário prover fontes acústicas e receptores em um poço em produção. Ferramentas usadas no laboratório não são aplicáveis à prospecção de furo abaixo; a prospecção de furo abaixo requer que as fontes e receptores sejam protegidos e não tamponados pelo fluxo.

Sensores

[00068] Com respeito a receptores, esses objetivos podem ser satisfeitos por sensores de fibra óptica colocados no exterior do tubo (peneira de areia, tubulação ou revestimento). Em adição, tais sensores podem ser completamente passivos e, por conseguinte, não requerem energia elétrica. Testamos esta idéia pela comparação de registro de hidrofone dentro do tubo de plástico com sismogramas por fibra óptica "sobre o tubo". Boa concordância foi observada entre os dois conjuntos de medições.

[00069] Enquanto que dentro do tubo em baixas frequências, tanto o tubo quanto as ondas de placa sejam descritas pelo movimento do tipo de pistão, as ondas sobre as paredes de tubo produzem principalmente deslocamento radial, enquanto as ondas de placa produzem principalmente deslocamento axial. Uma fibra enrolada em torno do tubo detecta o deslocamento radial do tubo, que é característico das ondas de tubo - algumas vezes chamado modos de "respiração". Em adição, a média azimutal realizada por sensores de fibra óptica tende a suprimir outros ruídos e destacar a onda de tubo simétrica ao

eixo.

[00070] O enrolamento de fibra sobre o exterior da peneira de areia ou revestimento pode ser implementado usando uma ferramenta de formação de imagem de revestimento em tempo real (RTCI), que tem o objetivo de medir as deformações do tubo. Sensores de RTCI tendem a ser estreitamente espaçados para detectar deformações estáticas quase assimétricas, enquanto que a presente monitoração de conclusão em tempo real (RTCM) preferivelmente usa uma média em torno da circunferência do tubo em locais discretos, mas a um fino intervalo de amostragem no tempo.

Sistema de fibra óptica de laboratório

[00071] O atual sistema de fibra óptica usado na instalação de teste foi um sistema interferométrico baseado em interferômetros de Michelson. Um interferômetro de Michelson consiste de um divisor de sinal, uma bobina de referência, uma bobina de detecção e dois Espelhos Rotativos de Faraday (FRMs), um colocado na extremidade de cada bobina de fibra. A luz modulada proveniente do laser é dividida e se desloca abaixo das bobinas de referência e bobina de detecção. Ambos os sinais refletem nos FRMs e se deslocam de volta para o divisor, onde eles interferem e a luz é encaminhada de volta para os componentes opto-eletrônicos usando o segundo condutor de fibra.

[00072] A bobina de detecção é enrolada em torno do tubo e sofre tensão quando o tubo respira. A bobina de referência é preferivelmente localizada muito perto da bobina de detecção, de modo a minimizar qualquer captação de ruído depois de os sinais interferirem. O ponto de interferência entre o sinal de detecção e a bobina de referência é o divisor/combinador, que é posicionado no furo abaixo com as bobinas. A tensão induzida no tubo durante o movimento de respiração causa uma variação dinâmica em comprimento de trajeto óptico na bobina de detecção em comparação com a bobina de referência. A alteração em comprimento de trajeto óptico causa um

deslocamento no sinal interferométrico, o qual, por sua vez, pode ser relacionado com a magnitude e frequência do movimento de respiração do tubo.

[00073] O benefício principal deste esquema é a facilidade de instalação e flexibilidade para mover sensores individuais entre diferentes locais sobre o tubo bem como entre diferentes instalações de teste. Um sistema experimental com 24 sensores usa 48 condutores de fibra óptica, que pode ser gerido em um ambiente de laboratório, mas não prático para uma prospecção de campo.

Sistema de fibra óptica para instalação de campo

[00074] Um sistema para prospecção de campo usaria preferivelmente um esquema de multiplexação de sinal baseado em Multiplexação por Divisão de Frequência (FDM) e Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM), os quais reduziriam o número de condutores de fibra óptica correndo da seção de detecção para a superfície. A bobina de referência do interferômetro de Michelson não é preferido para a prospecção de campo, pois a bobina de referência requereria algum espaço entre a tubulação e o revestimento. O sistema interferométrico de Michelson selecionado é ideal para os experimentos de laboratório atuais, onde um alto grau de flexibilidade é desejado, combinado com o desempenho mais alto possível e cancelamento de ruído. Todavia, pode ser sub-ótimo a partir de uma perspectiva de prospecção total, dada sua área útil mecânica.

[00075] Outras técnicas para fazer as medições desejadas existem e podem também ser não práticas para prospecção de campo. Duas opções em particular oferecem bom desempenho e podem ser compatíveis com o presente sistema. Ambos desses sistemas usam uma fibra óptica contínua.

[00076] A primeira tecnologia é baseada no interferômetro de Fabry-Perot, onde espelhos refletores são gravados na fibra óptica. A bobina de detecção gravada é enrolada em torno do tubo, como para o interferômetro de Michelson, e sofre tensão quando o tubo respira. A bobina de referência está

relativamente longe da bobina de detecção e os pulsos de sinal podem captar ruído à medida que eles se deslocam pelo cabo depois de os sinais interferirem. A tensão induzida no tubo durante o movimento de respiração causa uma alteração dinâmica no comprimento de trajeto óptico na bobina de detecção em comparação com a bobina de referência. A alteração em comprimento de trajeto óptico causa um deslocamento no sinal interferométrico, que por sua vez pode ser relacionado com a magnitude e frequência do movimento de respiração do tubo. O benefício do sistema de Fabry-Perot é o menor área útil de furo de sondagem. A desvantagem é o ruído potencialmente mais alto que pode ser captado pelo cabo que conecta os sensores aos componentes opto-eletrônicos da superfície.

[00077] A segunda tecnologia, "Blue ROSE", foi desenvolvida pelo Naval Undersea Warfare Center para aplicação de segurança militar, em que 'ROSE' é um acrônimo para Rayleigh Optical Scattering e Encoding. A tecnologia Blue ROSE detecta perfis de retro-dispersão de Rayleigh (ou "impressões digitais") ao longo do comprimento da fibra. Cada segmento da fibra óptica tem um único perfil de dispersão devido às impurezas aleatórias na fibra que causam a dispersão de Rayleigh. O sistema de Blue ROSE usa as impressões digitais de Rayleigh na fibra óptica como os refletores de Fabry-Perot. O sistema pode usar dinamicamente diferentes impressões digitais de Rayleigh em qualquer lugar ao longo do comprimento da fibra. Blue ROSE tem o potencial de combinar ambos os sistemas RTCI e RTCM em um único cabo, o que seria desejável para a completa vigilância do furo abaixo.

Fontes

[00078] Tanto configuração de transmissão quanto de reflexão de RTCM requerem a excitação repetível da onda de tubo de furo abaixo. Isto pode ser obtido de duas maneiras diferentes, descritas abaixo, usando tanto fontes ativas quanto fontes passivas.

Fontes ativas

[00079] Em princípio, uma fonte ativa dedicada pode ser fixada mecanicamente sobre o exterior da tubulação ou peneira, de forma similar, e pode ser mecânica ou magneto-estritiva. À parte da instalação adicional no poço, esta proposta também requer cabo de energia elétrica para suprir a fonte.

Fontes de ruído passivas

[00080] Uma alternativa menos exigente pode ser usar ruído de fluxo ou outros distúrbios como um sinal passivo e obter resposta entre dois sensores usando correlação cruzada. Assim chamados "correlacionadores de ruído" foram usados para detectar o local de fugas subsuperficiais nos tubos. Posteriormente, técnica de correlação cruzada similar de sensores sobre o tubo de fibra óptica foi utilizada para medir velocidade de onda de tubo e inverter para composição de fluido e velocidade de fluido na superfície e tubos de furo abaixo. No caso de furo abaixo, o medidor de fluxo acústico preferivelmente compreende um arranjo de sensores de fibra óptica instalados no exterior da tubulação, próximos à conclusão e realizam medições acústicas em tempo real enquanto o poço é escoando.

Fonte Efetiva

[00081] Correlação cruzada é uma versão de ID do método de Virtual Sourcetm mais geral descrito na Patente US No. 6.747.915 e pedido internacional WO2008064100. Depois da correlação cruzada de, por exemplo, um registro no primeiro receptor com aquele nos sensores restantes é possível obter uma resposta se o sinal foi atualmente emitido a partir de uma "Fonte Efetiva" colocada no local do primeiro receptor. Uma vez que medimos diretamente o sinal incidente na fonte efetiva - conhecemos a assinatura de fonte e podemos configurá-lo quando desejado. Isto é importante, pois ele pode permitir duas etapas importantes - o empilhamento de múltiplos registros configurados com a mesma assinatura de fonte para melhorar a relação de sinal para ruído, e avaliação de não somente velocidade,

mas também atenuação dos sinais de onda de tubo. Assim, em algumas formas de concretização, o método de fonte virtual é usado para permitir a implementação de uma versão completamente passiva de RTCM sem fontes ativas de furo abaixo.

[00082] Os seguintes exemplos são incluídos para demonstrar formas de concretização preferidas da invenção. Deve ser apreciado por aqueles especializados na arte que as técnicas reveladas nos exemplos que seguem representam técnicas descobertas pelos inventores para funcionarem de boa maneira na prática da invenção, e assim podem ser consideradas constituírem modos preferidos de sua prática. Todavia, aqueles especializados na arte devem apreciar, à luz da presente exposição, que muitas alterações podem ser feitas nas formas de concretização específicas que são reveladas e ainda obter um mesmo resultado ou resultado similar sem fugir do escopo da invenção.

Discussão de instalação experimental

[00083] A instalação de enlace de fluxo inicial com tubo de Plexiglas e peneiras de PVC não foi bem apropriada para medições acústicas por causa da atenuação extremamente alta e baixas velocidades. Ela foi também não representativa em termos de propriedades acústicas para um caso de campo com tubulações de aço. A instalação de vidro usada nos experimentos atuais foi um aperfeiçoamento, mas ainda permanece sub-ótima devido a peneiras de PVC acusticamente lentas e atenuantes bem como devido às fortes reflexões inter-juntas que contaminaram os dados. Embora o processamento tenha parcialmente ajudado a tratar com essas reflexões parasíticas, juntas de tais projetos não são representativas de um caso de campo e, assim, devem ser evitadas. É preferível usar uma instalação de alumínio com tubo externo de alumínio e peneiras de alumínio para atingir velocidades quase acústicas, típicas para as tubulações de aço, enquanto ainda permanece com um baixo peso, e que possa ser manuseada no laboratório. Para evitar reflexões inter-juntas, é recomendável reduzir o número de seções de tubo e suspender o tubo

fora das eslingas.

Aquisição acústica

[00084] Aquisição acústica no laboratório utilizou 24 sensores com espaçamento de 35 cm. Para evitar distorção, é preferido ter um espaçamento de sensor igual ou menor que $\frac{1}{2}$ do comprimento de onda da onda de interesse computada na frequência dominante. Assim, para conclusões tamponadas por cascalho com velocidades esperadas de ~ 700 m/s e frequência central ~ 700 Hz, o comprimento de onda é ~ 1 m e espaçamento de 0,5 m ou menor é preferido. Em conclusões com nenhum enchimento de cascalho, ou se fluidização for suspeita, velocidades lentas de onda de tubo de ~ 300 m/s são esperadas e menores intervalos de amostragem são desejáveis. Evidentemente, se uma frequência mais baixa puder ser usada em uma maneira satisfatória, então a amostragem pode ser aumentada, todavia a frequência mais baixa tende a produzir menor resolução espacial.

[00085] Também descobrimos que modos de onda de tubo lenta podem ser excitados em regiões anulares abertas, e estas ondas podem ser detectadas. Assim, condições dentro de poço e dentro de espaço anular podem ser determinadas usando registros de onda de tubo a partir de fontes ativas e/ou passivas. Esta técnica é útil para, por exemplo, identificar regiões anulares não cimentadas ou parcialmente cimentadas atrás de revestimento em um poço. Este método complementaria as técnicas de perfilagem mais convencionais. Além disso, observações passivas destes modos de onda de tubo poderiam ser indicativas de fenômenos tais como fluxo detrás de revestimento ou deformação de revestimento atuando como fontes. Algumas formas de concretização da invenção, por conseguinte, incluem a transmissão de um sinal acústico para o fluido, o qual pode ser acusticamente acoplado ao espaço anular e inferindo que a camada de cimento está incompleta se um modo de onda de tubo anular lento é observado.

Referência ao Apêndice

[00086] Um Apêndice compreendendo velocidade de frequência zero em modelos com um ou dois tubos concêntricos foi anexado ao pedido parente, do qual este pedido reivindica prioridade, os conteúdos inteiros do qual são incorporados aqui para referência.

[00087] Outras e adicionais formas de concretização que utilizam um ou mais aspectos das invenções descritas acima podem ser concebidas sem fugir do escopo da invenção. Por exemplo, as técnicas de monitoração acústica em tempo real descritas aqui podem ser aplicadas não somente à monitoração de conclusões peneiradas por areia e cheias de cascalho, mas também a outras aplicações de conclusão e furo abaixo, tais como operações de recuperação. Adicionalmente, os vários métodos e várias formas de concretização dos métodos de monitoração acústica podem ser incluídos em combinação um com o outro para produzir variações dos métodos, métodos, aparelhos, e formas de concretização revelados.

[00088] A ordem das etapas pode ocorrer em uma variedade de sequências, a menos que especificamente limitada de outra maneira. As várias etapas descritas aqui podem ser combinadas com outras etapas, interlinearizadas com as etapas mencionadas, e/ou divididas em múltiplas etapas. Similarmente, elementos que foram descritos funcionalmente podem ser incorporados como componentes separados ou podem ser combinados em componentes que têm múltiplas funções.

[00089] As invenções foram descritas no contexto de formas de concretização preferidas e outras formas de concretização e não cada forma de concretização da invenção foi descrita. Modificações e alterações óbvias das formas de concretização descritas são disponíveis para aqueles de conhecimento comum na arte. As formas de concretização reveladas e não reveladas não pretendem limitar ou restringir o escopo ou aplicabilidade da invenção concebida pelas depositantes, mas, em contraste, em conformidade com as leis de patente, as depositantes pretendem proteger totalmente todas de

tais modificações, e aperfeiçoamentos, que caem dentro do escopo ou faixa de equivalente das seguintes reivindicações.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para monitorar escoamento de fluido através de um dispositivo de furo abaixo em um furo de sondagem (10), caracterizado pelo fato de que compreende:

a) prover uma onda de tubo acústica (12) no fluido (30) no dispositivo;

b) medir a onda de tubo acústica (12) depois de ela ter passado através do fluido no dispositivo; onde as medições são feitas usando uma pluralidade de sensores (34) distribuídos no furo de sondagem (10);

- correlacionar de forma cruzada um sinal recebido em um primeiro receptor com sinais recebidos em sensores adicionais de modo a obter uma resposta efetiva se o sinal foi emitido a partir de uma fonte em uma posição de dito primeiro receptor; e

c) avaliar a permeabilidade do dispositivo pela medição da atenuação do sinal acústico.

2. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a etapa c) inclui ainda medir alterações em velocidade do sinal acústico.

3. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o dispositivo é um dispositivo de furo abaixo permeável, e a etapa c) inclui ainda determinar que o dispositivo esteja pelo menos parcialmente tamponado pela detecção de pelo menos um dentre uma redução em atenuação ou uma redução em perda de velocidade na onda de tubo (12) quando ela passa através do dispositivo.

4. Método de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que inclui ainda ajustar as propriedades de fluidos no furo de sondagem (10) em resposta a uma determinação que o dispositivo está pelo menos parcialmente tamponado.

5. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo

fato de que o dispositivo é selecionado dentre o grupo consistindo de peneiras de areia (14), recheio com cascalho, peneiras de recheio com cascalho, peneiras com envoltório de arame, peneiras mecânicas, peneiras tendo tubo de base completamente ou parcialmente perfurado e um meio de filtro disposto sobre o mesmo, e revestimento perfurado (18).

6. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o dispositivo é um dispositivo de preenchimento de cascalho e em que as medições feitas na etapa c) são indicativas de propriedades de um processo de preenchimento de cascalho.

7. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que os sensores são distribuídos permanentemente no furo de sondagem (10).

8. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que os sensores (34) são sensores de fibra óptica.

9. Método de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que os sensores (34) são suportados sobre um dispositivo que é envolvido em torno de pelo menos uma da peneira de areia (14) ou outra tubulação de furo abaixo.

10. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o dispositivo é um dispositivo de furo abaixo permeável e a etapa c) inclui ainda determinar que o dispositivo não esteja tamponado pela detecção de que uma onda de tubo (12) rápida passando através do dispositivo é retardada em baixas frequências, mas é acelerada em altas frequências.

11. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que inclui ainda a etapa de determinar a permeabilidade relativa do dispositivo pela detecção de uma banda de frequência tendo um grau de atenuação relativamente alto e comparar a frequência de dita banda com aquela de uma banda de frequência tendo um grau de atenuação relativamente alto em uma medição diferente.

12. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o dispositivo é um dispositivo de furo abaixo permeável e a etapa c) inclui ainda determinar que o dispositivo não esteja tamponado por medir uma onda rápida e detectar uma atenuação relativamente forte de dita onda rápida.

13. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o dispositivo é um dispositivo de furo abaixo permeável e a etapa c) inclui ainda determinar que o dispositivo não esteja tamponado pela detecção de uma onda de tubo (12) lenta com amplitude e velocidade reduzidas.

14. Método para produzir hidrocarbonetos a partir de uma formação portando hidrocarboneto (20, 22), caracterizado pelo fato de que compreende produzir hidrocarbonetos através de um dispositivo de furo abaixo permeável e monitorar o escoamento através do dispositivo usando o método de acordo com a reivindicação 1.

15. Método para monitorar escoamento de fluido através de um dispositivo de furo abaixo em um furo de sondagem (10), caracterizado pelo fato de que compreende:

a) prover uma onda de tubo acústica (12) no fluido (30) no dispositivo;

b) medir a onda de tubo acústica depois de ela ter passado através do fluido no dispositivo; e

c) avaliar a permeabilidade do dispositivo pela medição da atenuação do sinal acústico,

onde o dispositivo é um dispositivo de furo abaixo permeável e a etapa c) inclui ainda determinar que o dispositivo esteja pelo menos parcialmente tamponado pela detecção de pelo menos um dentre uma redução em atenuação ou uma redução em perda de velocidade na onda de tubo (12) quando ela passa através do dispositivo.

16. Método para monitorar escoamento de fluido através de um dispositivo de furo abaixo em um furo de sondagem (10), caracterizado pelo fato de que compreende:

a) prover uma onda de tubo acústica (12) no fluido (30) no dispositivo;

b) medir a onda de tubo acústica depois de ela ter passado através do fluido no dispositivo; e

c) avaliar a permeabilidade do dispositivo pela medição da atenuação do sinal acústico,

onde o método inclui ainda ajustar as propriedades de fluidos no furo de sondagem (10) em resposta a uma determinação que o dispositivo está pelo menos parcialmente tamponado.

17 Método para monitorar escoamento de fluido através de um dispositivo de furo abaixo em um furo de sondagem (10), caracterizado pelo fato de que compreende:

a) prover uma onda de tubo acústica (12) no fluido (30) no dispositivo;

b) medir a onda de tubo acústica depois de ela ter passado através do fluido no dispositivo; e

c) avaliar a permeabilidade do dispositivo pela medição da atenuação do sinal acústico,

onde o dispositivo é um dispositivo de furo abaixo permeável e a etapa c) inclui ainda determinar que o dispositivo não esteja tamponado pela detecção de que uma onda de tubo (12) rápida passando através do dispositivo é retardada em baixas frequências, mas é acelerada em altas frequências.

18. Método para monitorar escoamento de fluido através de um dispositivo de furo abaixo em um furo de sondagem (10), caracterizado pelo fato de que compreende:

a) prover uma onda de tubo acústica (12) no fluido (30) no dispositivo;

b) medir a onda de tubo acústica depois de ela ter passado através do fluido no dispositivo; e

c) avaliar a permeabilidade do dispositivo pela medição da atenuação do sinal acústico,

onde o método inclui ainda a etapa de determinar a permeabilidade relativa do dispositivo pela detecção de uma banda de frequência tendo um grau de atenuação relativamente alto e comparar a frequência de dita banda com aquela de uma banda de frequência tendo um grau de atenuação relativamente alto em uma medição diferente.

19.Método para monitorar escoamento de fluido através de um dispositivo de furo abaixo em um furo de sondagem (10), caracterizado pelo fato de que compreende:

a) prover uma onda de tubo acústica (12) no fluido (30) no dispositivo;

b) medir a onda de tubo acústica depois de ela ter passado através do fluido no dispositivo; e

c) avaliar a permeabilidade do dispositivo pela medição da atenuação do sinal acústico,

onde o dispositivo é um dispositivo de furo abaixo permeável e a etapa c) inclui ainda determinar que o dispositivo não esteja tamponado por medir uma onda rápida e detectar uma atenuação relativamente forte de dita onda rápida.

20.Método para monitorar escoamento de fluido através de um dispositivo de furo abaixo em um furo de sondagem (10), caracterizado pelo fato de que compreende:

a) prover uma onda de tubo acústica (12) no fluido (30) no dispositivo;

b) medir a onda de tubo acústica depois de ela ter passado através do fluido no dispositivo; e

c) avaliar a permeabilidade do dispositivo pela medição da atenuação do sinal acústico,

onde o dispositivo é um dispositivo de furo abaixo permeável e a etapa c)

inclui ainda determinar que o dispositivo não esteja tamponado pela detecção de uma onda de tubo (12) lenta com amplitude e velocidade reduzidas.

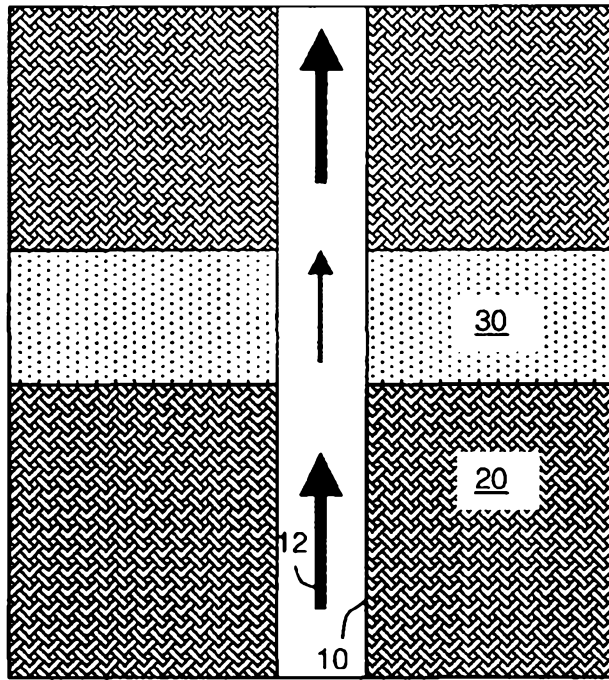


Fig. 1

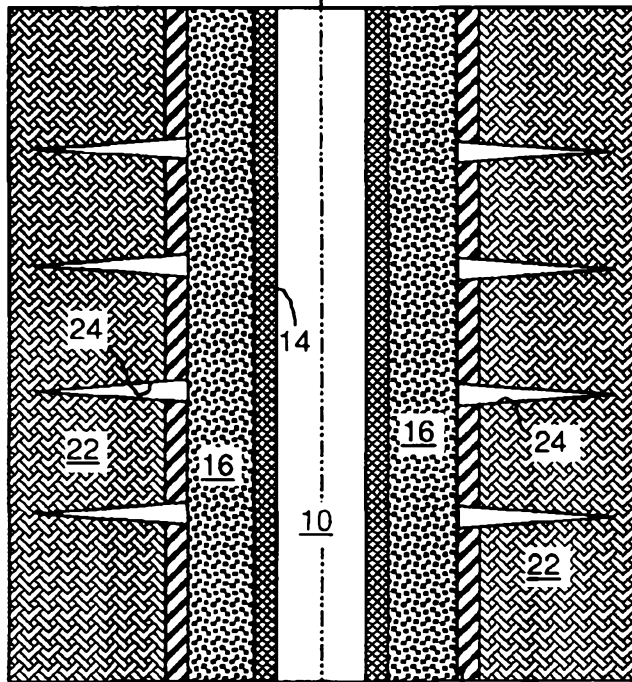


Fig. 2

18

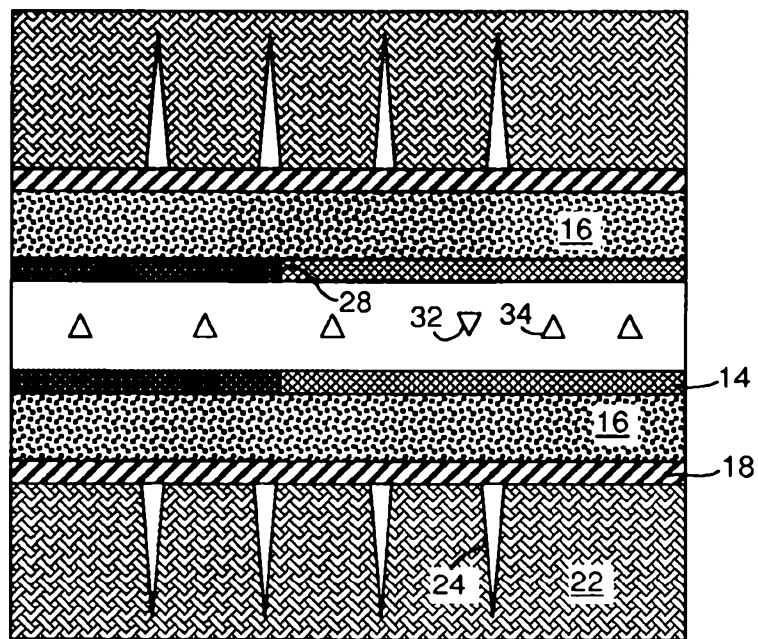


Fig. 3