

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
*E21B 28/00* (2019.08); *E21B 43/25* (2019.08)

(21)(22) Заявка: 2019101241, 14.01.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
14.01.2019Дата регистрации:  
05.11.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 14.01.2019

(45) Опубликовано: 05.11.2019 Бюл. № 31

Адрес для переписки:

420088, Респ. Татарстан, г. Казань, ул.  
Арбузова, 8, ФИЦ КазНЦ РАН, Патентный  
отдел

(72) Автор(ы):

Абдрашитов Алексей Алланович (RU),  
Марфин Евгений Александрович (RU),  
Чачков Денис Владимирович (RU),  
Чефанов Владимир Матвеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки "Федеральный  
исследовательский центр "Казанский  
научный центр Российской академии наук"  
(RU)(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2653205 C2, 07.05.2018. RU  
2670623 C1, 24.10.2018. RU 2574889 C2,  
10.02.2016. RU 2637008 C2, 29.11.2017. US  
4041984 A1, 16.08.1977. US 5165438 A1,  
24.11.1992.

(54) Способ генерирования волн давления в затрубном пространстве нагнетательной скважины и струйный акустический излучатель с коротким соплом и щелевым резонатором для его осуществления

(57) Реферат:

Изобретение относится к нефтедобывающей промышленности, а именно к способу и устройству генерирования волн давления в затрубном пространстве нагнетательной скважины, и предназначено для очистки от твердых отложений стенок обсадных труб и отверстий перфорации, декольматации призабойной зоны пласта и увеличения подвижности пластовых флюидов. Предложен способ генерирования волн давления в затрубном пространстве нагнетающей скважины, отличием которого является то, что разгонный участок струи частично размещают внутри сопла, а оставшуюся часть - в камере-резонаторе таким образом, чтобы наименьшее сечение струи  $d_{min}$  находилось в плоскости острой кромки выходного отверстия, при этом семейство мод сводят к единственной моде с высокой интенсивностью, существующей в широком

интервале числа Струхалея. Представлен также струйный акустический излучатель (САИ) для генерирования волн давления в затрубном пространстве нагнетательной скважины, представляющий собой цилиндрическую камеру-резонатор с двумя крышками, установленный в скважине на хвостовике НКТ, в котором имеется короткое сопло и выходное отверстие с острой кромкой. Струя жидкости движется в короткой камере между соплом и выходным отверстием. Новым является применение короткого сопла длиной  $l_c \approx dc/2$  и короткой камеры резонатора  $L_k \approx dc/2$  при диаметре выходного отверстия  $d_{вых} = 1,7 \dots 1,8dc$ , что позволяет обеспечить интенсивную генерацию в широком интервале изменения скорости струи. Технический результат заключается в увеличении амплитуды колебаний давления в затрубном пространстве

нагнетательной скважины в 3 и более раз. 2 н.п.

ф-лы, 5 ил.

R U 2 7 0 5 1 2 6 C 1

R U 2 7 0 5 1 2 6 C 1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC

*E21B 28/00 (2019.08); E21B 43/25 (2019.08)*(21)(22) Application: **2019101241, 14.01.2019**(24) Effective date for property rights:  
**14.01.2019**Registration date:  
**05.11.2019**

Priority:

(22) Date of filing: **14.01.2019**(45) Date of publication: **05.11.2019 Bull. № 31**

Mail address:

**420088, Resp. Tatarstan, g. Kazan, ul. Arbuzova,  
8, FITS KazNTS RAN, Patentnyj otdel**

(72) Inventor(s):

**Abdrashitov Aleksej Allanovich (RU),  
Marfin Evgenij Aleksandrovich (RU),  
Chachkov Denis Vladimirovich (RU),  
Chefanov Vladimir Matveevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethoe  
uchrezhdenie nauki "Federalnyj issledovatel'skij  
tsentr "Kazanskij nauchnyj tsentr Rossijskoj  
akademii nauk" (RU)**(54) **METHOD OF GENERATING PRESSURE WAVES IN THE ANNULAR SPACE OF AN INJECTION WELL AND A JET ACOUSTIC RADIATOR WITH A SHORT NOZZLE AND A SLOT RESONATOR FOR ITS IMPLEMENTATION**

(57) Abstract:

FIELD: oil and gas industry.

SUBSTANCE: invention relates to oil industry, namely to method and device for generation of pressure waves in annular space of injection well, and is intended for cleaning from solid deposits of walls of casing pipes and holes of perforation, decolmatation of bottomhole formation zone and increased mobility of reservoir fluids. Disclosed is a method of generating pressure waves in the annular space of the injector, the difference of which is that the acceleration section of the jet is partially placed inside the nozzle, and the remaining part – in the resonator chamber so that the minimum section of the jet  $d_{min}$  is in the plane of the sharp edge of the outlet hole, wherein the family of modes is reduced to a single mode with high intensity existing in a wide range of the Struhal number. Also disclosed

is a jet acoustic radiator (JAR) for generation of pressure waves in the annular space of the injection well, which is a cylindrical chamber-resonator with two covers, installed in the well on the shank of the production string, in which there is a short nozzle and an outlet hole with a sharp edge. Liquid jet moves in the short chamber between the nozzle and the outlet hole. Novelty is application of short nozzle of length  $l_n \approx dn/2$  and short resonator chamber  $L_c \approx dn/2$  with outlet diameter  $d_{out} = 1.7...1.8dn$ , which enables to provide intensive generation in a wide range of jet velocity variation.

EFFECT: increased amplitude of pressure fluctuations in annular space of injection well in 3 and more times.

2 cl, 5 dwg

Изобретение относится к нефтедобывающей промышленности, а именно к способу и устройству генерирования волн давления в затрубном пространстве нагнетательной скважины, и предназначено для очистки от твердых отложений стенок обсадных труб и отверстий перфорации, декольматации призабойной зоны пласта и увеличения подвижности пластовых флюидов.

Известен способ генерирования волн давления в стволе нагнетательной скважины см. [RU 2122109 C1, 20.11.1998], при котором устанавливают на конце насосно-компрессорной трубы (НКТ) гидродинамический генератор (ГГ), закачивают сжимаемую жидкость через НКТ, прокачивают жидкость через ГГ, генерируют колебания давления внутри ГГ и формируют волны давления за ГГ в стволе нагнетающей скважины и далее - в затрубном пространстве.

Добывающие нефтяные скважины периодически прочищают от твердых отложений на стенках и в отверстиях перфорации обсадной трубы, закачивая различные технические сжимаемые жидкости (газ, воздух, пар). При этом замечено, что наличие колебаний давления в прокачиваемой жидкости способствует достижению лучшего результата.

Наиболее эффективны способы создания колебаний давления в стволе нагнетающей скважины при помощи ГГ, устанавливаемых непосредственно в том месте, где они наиболее востребованы, т.е. на нижнем конце НКТ, напротив отверстий перфорации. При таком способе генерирования колебаний давления, вся жидкость прокачивается через ГГ, который создает колебания давления в протекающей через него жидкости, распространяя свое воздействие на прилегающую область продуктивного пласта.

В ГГ отсутствуют подвижные детали. ГГ представляет собой устройство, в котором часть кинетической энергии потока прокачиваемой жидкости (газа) преобразуется в колебательную энергию при помощи специальной формы канала.

Недостаток ГГ заключается в том, что лишь небольшая доля кинетической энергии потока преобразуется в колебательную энергию.

Известен способ генерирования волн давления в стволе нагнетательной скважины, реализованный в устройстве [RU 2670623 C2, 24.10.2018] наиболее близкий по технической сущности и взятый за прототип, при котором устанавливают на нижнем конце насосно-компрессорной трубы (НКТ) струйный акустический излучатель, состоящий из: камеры-резонатора с двумя крышками; сопла с сопловым срезом, выполненного в передней крышке; и выходного отверстия с острой кромкой, выполненного соосно соплу в задней крышке; в котором сопло соединяют с НКТ, а выходное отверстие направляют в затрубное пространство скважины, при этом, подают жидкость по НКТ в сопло, формируют в камере-резонаторе в интервале между сопловым срезом и выходным отверстием струю жидкости, характеризующуюся наличием разгонного участка с плавным увеличением скорости струи и последующего участка свободного истечения с плавным расширением струи, и направляют струю жидкости на острую кромку выходного отверстия, генерируют первичные колебания давления в области острой кромки, усиливают эти первичные колебания давления в камере-резонаторе, частота собственных колебаний которой настроена в резонанс с частотой генерации первичных колебаний давления, формируют семейство мод на частоте акустического резонанса, характеризующееся определенным набором чисел Струхаля, и создают волны давления за выходным отверстием в затрубном пространстве скважины.

Это устройство названо струйным резонатором Гельмгольца (Jet Driven Helmholtz Oscillator), что можно было бы перевести и как управляемый струей резонатор Гельмгольца, или же возбуждаемый струей резонатор Гельмгольца. Мы его называем

(применительно к использованию в качестве скважинного устройства) струйным акустическим излучателем (САИ).

САИ различаются конструктивно, но, как правило, включают в свой состав две основные части: струйный генератор (СГ) и камеру объемного резонатора (КОР), функционирующие относительно самостоятельно. СГ включает сопло - струю жидкости - острую кромку и предназначен для преобразования некоторой части кинетической энергии струи в энергию первичных колебаний давления. КОР предназначена для увеличения амплитуды первичных колебаний давления. Для усиления первичных колебаний давления необходимо согласовать частоту их генерации с частотой собственных колебаний КОР. Иными словами, две части одного устройства должны быть настроены в унисон для достижения резонанса.

Генератор активен, он сам создает первичные колебания давления, поскольку в его составе имеется высокоскоростная струя, располагающая для этого запасом кинетической энергии. Резонатор пассивен, он лишь откликается, т.е. усиливает колебания давления, созданные каким-то другим устройством, поскольку заключенный в нем столб газа почти неподвижен.

Процесс генерации колебаний давления в СГ начинают с разгона потока, поскольку амплитуда колебаний давления  $A$  увеличивается с увеличением величины скоростного напора  $A \sim \rho W^2/2$  струи. Разгон потока осуществляется в сопле, которое кроме увеличения скорости служит еще для формирования круглой струи. Сформированная свободная струя направляется через всю камеру-резонатор прямо в выходное отверстие и задевает своей возмущенной периферией его острую внутреннюю кромку. Это порождает небольшие локальные возмущения давления в области острой кромки. Резонатор служит для усиления этих первичных колебаний давления. Недостатком способа, взятого за прототип, является невысокая эффективность взаимодействия струи с острой кромкой выходного отверстия, вследствие образования пленочной завесы, окружающей струю.

Известен струйный акустический излучатель для генерирования волн давления в потоке жидкости [US 602974 A 29.02.2000], представляющий собой полое тело вращения и состоящее из: цилиндрической камеры с двумя крышками; цилиндрического сопла, выполненного в центре передней крышки и выходного отверстия с острой кромкой, выполненного соосно соплу в центре задней крышки; причем.

Устройство снабжено цилиндрическим соплом, представляющим собой сквозное сверление в плоской передней крышке. Сопло начинается с острой входной кромки и заканчивается острой выходной кромкой. Плоскость выходного среза сопла расположена на внутренней поверхности передней крышки. Выходное отверстие также представляет собой сквозное сверление в плоской задней крышке. Входная кромка выходного отверстия острая. Острая входная кромка выходного отверстия расположена на внутренней поверхности задней крышки.

Недостатком устройства является излишняя длина сопла, которая существенно превышает диаметр сопла, а также излишняя длина камеры резонатора, которая существенно превышает диаметр сопла.

Из [RU 2670623 C2, 24.10.2018] известен струйный акустический излучатель для генерирования волн давления в потоке жидкости, наиболее близкий по технической сущности и взятый за прототип, представляющий собой полое тело вращения и состоящий из: цилиндрической камеры, ограниченной двумя плоскими крышками; сопла, представляющего собой сквозное отверстие в центре передней крышки; и выходного отверстия с острой входной кромкой, выполненного соосно соплу в центре задней крышки, причем сопло заканчивается плоским сопловым срезом, ортогональным

оси сопла и расположенным на внутренней стенке передней крышки, а плоскость входа в выходное отверстие ортогональна оси выходного отверстия и расположена на внутренней стенке задней крышки.

Струйный акустический излучатель представляет собой цилиндрическую камеру с двумя плоскими крышками. В центре передней крышки выполнено сопло цилиндрической формы, которое подсоединяется к магистрали подачи рабочей жидкости. В центре задней крышки, соосно соплу, выполнено выходное цилиндрическое отверстие с острой входной кромкой. Диаметр выходного отверстия примерно равен 1,3 диаметра сопла. Длина камеры равна интервалу между передней и задней крышками и соответствует длине струи, которая протекает внутри камеры между соплом и выходным отверстием.

Сопло представляет собой сквозное сверление в плоской передней крышке. Сопло обрезано плоскостью, ортогональной оси сопла и совпадающей с внутренней стенкой передней крышки. Выход сопла обращен внутрь камеры, диаметр которой значительно превышает диаметр сопла.

Выходное отверстие также представляет собой сквозное сверление в центре задней крышки и имеет плоскую острую кромку на входе, который находится на внутренней стенке задней крышки.

Недостатком устройства является большой интервал между входом сопла и острой входной кромкой выходного отверстия.

Задачей настоящего изобретения является обеспечение устойчивой генерации с высокой интенсивностью акустических колебаний в широком интервале скорости струи жидкости при генерировании волн давления в затрубном пространстве в стволе нагнетательной скважины (увеличение интенсивности генерации в САИ) для повышения степени очистки от твердых отложений стенок обсадных труб и отверстий перфорации, декольматации призабойной зоны пласта и увеличения подвижности пластовых флюидов.

Технический результат изобретения состоит в уменьшении толщины вялотекущей пленки, обволакивающей струю жидкости на выходе из сопла излучателя, что приводит к увеличению интенсивности взаимодействия струи с острой кромкой выходного отверстия, вследствие чего наблюдается заметное усиление генерации первичных колебаний давления в области острой кромки и увеличение амплитуды колебаний давления на выходе из устройства. Уменьшение толщины вялотекущей пленки достигается укорочением зоны обратных токов в канале сопла, где эта пленка образуется, за счет размещения разгонного участка струи, характеризующегося небольшой толщиной слоя смещения, в интервале между входом сопла и острой входной кромкой выходного отверстия). Техническим результатом также является расположение острой кромки выходного отверстия на разгонном участке струи в области тонкого слоя смещения, что устраняет интервалы тишины в режиме генерации в устройстве САИ при изменении скорости струи.

Задача решается, и технический результат достигается за счет того, что способе генерирования волн давления в затрубном пространстве нагнетательной скважины, при котором устанавливают на нижнем конце насосно-компрессорной трубы (НКТ) скважинный акустический излучатель, состоящий из: камеры-резонатора с двумя крышками; сопла с сопловым срезом, выполненным в передней крышке; и выходного отверстия с острой кромкой, выполненного соосно соплу в задней крышке; в котором сопло соединяют с НКТ, а выходное отверстие направляют в затрубное пространство скважины, при этом, подают жидкость по НКТ в сопло, формируют в камере-резонаторе

в интервале между сопловым срезом и выходным отверстием струю жидкости, характеризующуюся наличием разгонного участка с плавным увеличением скорости струи и последующего участка свободного истечения с плавным расширением струи, и направляют струю жидкости на острую кромку выходного отверстия, генерируют первичные колебания давления в области острой кромки, усиливают эти первичные колебания давления в камере-резонаторе, частота собственных колебаний которой настроена в резонанс с частотой генерации первичных колебаний давления, формируют семейство мод на частоте акустического резонанса, характеризующееся определенным набором чисел Струхаля, и создают волны давления за выходным отверстием в затрубном пространстве скважины, разгонный участок струи частично размещают внутри сопла, а оставшуюся часть разгонного участка размещают в камере-резонаторе таким образом, чтобы наименьшее сечение струи  $d_{\min}$  находилось в плоскости острой кромки выходного отверстия, при этом, семейство мод сводят к единственной моде с высокой интенсивностью, существующей в широком интервале числа Струхаля.

В струйном акустическом излучателе для генерирования волн давления в потоке жидкости, представляющем собой полое тело вращения и состоящем из: цилиндрической камеры, ограниченной двумя плоскими крышками; сопла, представляющего собой сквозное отверстие в центре передней крышки; и выходного отверстия с острой входной кромкой, выполненного соосно соплу в центре задней крышки, причем, сопло заканчивается плоским сопловым срезом, ортогональным оси сопла и расположенным на внутренней стенке передней крышки, а плоскость входа в выходное отверстие ортогональна оси выходного отверстия и расположена на внутренней стенке задней крышки; длина цилиндрического сопла  $\ell_c$  примерно равна половине его диаметра  $d_c$  ( $\ell_c=0,5\dots0,7 d_c$ ), и длина камеры резонатора  $L_k$  также примерно равна половине диаметра сопла ( $L_k=0,4\dots0,5 d_c$ ), а выходное отверстие выполнено с диаметром  $d_{\text{вых}}$  равным  $1,7\dots1,8$  диаметра сопла  $d_c$  ( $d_{\text{вых}}=1,7\dots1,8 d_c$ ).

Предложенный способ позволяет за счет размещения разгонного участка струи, характеризующегося небольшой толщиной слоя смещения, в интервале между входом сопла и острой входной кромкой выходного отверстия, что обеспечивается выполнением: сопла - длиной  $\ell_c$  равной половине его диаметра  $d_c$  ( $\ell_c=d_c/2$ ); камеры резонатора - длиной  $L_k$  равной половине диаметра сопла  $d_c$  ( $L_k=d_c/2$ ); выходного отверстия - диаметром  $d_{\text{вых}}$  равным  $1,7\dots1,8 d_c$  ( $d_{\text{вых}}=1,7\dots1,8 d_c$ ); увеличить амплитуду колебаний давления в затрубном пространстве нагнетательной скважины в три и более раза.

На фиг. 1 представлена схема камеры струйного акустического излучателя с цилиндрическим соплом.

На фиг. 2 представлена схема заполнения струей камеры струйного акустического излучателя.

На фиг. 3 представлено схематическое изображение формирования зоны обратных токов в цилиндрическом канале сопла и образование влотекущей пленки, окружающей струю.

На фиг. 4 представлена "модовая картинка", воплощающая собой обработанные результаты эксперимента с САИ, имеющим длинное сопло и длинную камеру резонатора. Наблюдается семейство из пяти мод на различных характеристиках с различными числами Струхаля. Видно, что режим генерации перескакивает с одной характеристики на другую при изменении скорости струи, а моды разделены интервалами тишины.

На фиг. 5 представлена "модовая картинка", воплощающая собой обработанные результаты эксперимента с САИ, имеющим короткое сопло и короткую камеру резонатора. Наблюдается единственная мода во всем интервале рабочей скорости. Интервалов тишины внутри моды не наблюдается.

5 Сущность предложенного изобретения состоит в следующем.

Сопло, как известно, представляет собой сужение канала и служит для увеличения скорости потока, причем скорость потока на выходе из сопел различной формы различается весьма незначительно. Коэффициент скорости  $\phi$ , представляющий собой отношение истинной скорости к теоретической, составляет величину порядка 0,97 для  
10 сопел, значительно различающихся геометрически. На входе в канал цилиндрической формы струя сильно поджимается, огибая входную острую кромку, и площадь наименьшего сечения струи  $d_{\min}$  составляет порядка 62% площади канала. [см. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М. Машиностроение. 1992].

Проведенные эксперименты с цилиндрическими соплами различной длины показали,  
15 что амплитуда колебаний давления в камере-резонаторе САИ с соплами, длина которых  $\ell_c$  примерно равна половине их диаметра  $d_c$  ( $\ell_c \approx d_c/2$ ), может быть в три раза выше, нежели с соплом цилиндрической формы, длина которого больше его диаметра. Цилиндрические сопла с длиной  $\ell_c$  менее  $d_c/3$  показывают снова существенно худший  
20 результат. Оптимальная длина сопла САИ находится в интервале ( $d_c/3 < \ell_c < 2d_c/3$ ).

При этом, вторым необходимым условием высокой интенсивности генерации колебаний давления в камере резонатора является небольшая длина самой камеры  $L_k$ , менее половины диаметра сопла  $d_c$  ( $L_k < d_c/2$ ). Увеличение длины сопла свыше одного диаметра приводит к уменьшению интенсивности генерации в САИ даже при короткой  
25 камере резонаторе. Но в целом, короткая камера резонатора обеспечивает более высокую интенсивность генерации, нежели та же конструкция САИ, но с камерой длиннее половины диаметра сопла.

В цилиндрическом сопле, установленном в подводящей магистрали НКТ, представляющей собой трубу большего диаметра, поток значительно поджимается  
30 при повороте вокруг входной острой кромки и отрывается от стенки цилиндрического участка сопла (фиг. 2). Статическое давление в потоке (в дальнейшем просто давление) при увеличении скорости заметно уменьшается. Поток заполняет часть площади поперечного сечения сопла, а давление внутри канала сопла примерно соответствует давлению в потоке. Площадь наименьшего сечения струи  $d_{\min}$  составляет примерно  
35 62% от площади входного отверстия, а в кольцевом промежутке между стенкой сопла и потоком направленное движение отсутствует. По этой причине воздух из камеры устремляется внутрь сопла вдоль стенки по кольцевому промежутку, поскольку там давление ниже, чем давление в камере-резонаторе, формируя обратное течение возле стенки канала сопла (см. фиг. 3). Обратное течение (зона обратных токов ЗОТ)  
40 распространяет свое влияние почти до входной острой кромки сопла, и жидкость из камеры-резонатора движется по стенке почти до входной кромки сопла, а затем подхватывается потоком и выносится из сопла в камеру. Эта вялотекущая пленка, обволакивающая струю жидкости на выходе из сопла, снижает интенсивность взаимодействия струи с острой кромкой выходного отверстия, вследствие чего  
45 наблюдается заметное ослабление генерации первичных колебаний давления в области острой кромки и уменьшение амплитуды колебаний давления на выходе из устройства.

Как известно, коротким соплом считается сопло такой длины, когда его стенки не оказывают влияния на развивающуюся внутри канала сопла струю. Струя в таком

канале развивается по законам обтекания острой кромки. Если струя на выходе из канала задевает его стенку, то такой канал считается не соплом, а насадком. [Артемьева Т.В., Лысенко Т.М., Румянцева А.Н., Стесин С.П. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод. М. Издательский центр "Академия". 2005].

5 Из теории пограничного слоя известно, что при разгоне потока в канале и связанного с этим уменьшением давления по длине канала, толщина пограничного слоя увеличивается медленнее, нежели в случае торможения потока и увеличении давления по длине канала [Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. Наука. 1974. 712 с.].  
 Также ведет себя и слой смешения при свободном развитии струи на разгонном участке,  
 10 где давление в струе уменьшается до наименьшего сечения  $d_{min}$ . За наименьшим сечением струя начинает плавно расширяться и интенсивно смешиваться с окружающей жидкостью.

На разгонном участке слой смешения нарастает медленно, струя менее интенсивно смешивается с жидкостью в ЗОТ, и струя в меньшей степени окутана вялотекущей  
 15 пленкой на выходе из сопла. В случае идеальной жидкости (отсутствии сил вязкости) распределение скорости в наименьшем сечении струи имеет равномерную форму, и скорость жидкости на периферии струи такая же, как и в центре. Вследствие наличия сил вязкости и смешения струи с окружающей жидкостью в ЗОТ скорость на периферии струи существенно меньше, нежели в центре струи.

20 Для увеличения интенсивности генерации в САИ следует формировать струю с высокой скоростью на периферии и тонким слоем смешения по длине струи до ее взаимодействия с острой кромкой. Для этого следует располагать острую кромку не далее той плоскости, в которой площадь сечения струи имеет наименьшее значение. Длина разгонного участка должна превышать интервал между входом в сопло и входом  
 25 в выходное отверстие. Длина сопла и длина камеры в совокупности не должны быть длиннее разгонного участка струи. Эксперименты показывают, что наибольшая интенсивность генерации отмечается в том случае, когда сечение струи с  $d_{min}$  располагается в плоскости острой кромки.

Увеличение длины сопла приводит к увеличению длины участка, на котором струя  
 30 смешивается с обратными токами в канале. Это приводит к увеличению толщины пленки, окружающей струю на выходе из сопла и понижению интенсивности взаимодействия струи с острой кромкой.

Высокая скорость на периферии струи способствует большей интенсивности ее взаимодействия с острой кромкой выходного отверстия и возникновению первичных  
 35 колебаний давления (ПКД) большей интенсивности в области острой кромки. Если струя проскальзывает в выходное отверстие, не задевая острой кромки, или же задевает кромку своей вялотекущей периферией, то интенсивность генерации ПКД снижается. Также снижается интенсивность волн давления на выходе из САИ.

Та же логика прослеживается в отношении влияния длины камеры резонатора на  
 40 интенсивность взаимодействия струи с острой кромкой выходного отверстия. До наименьшего сечения  $d_{min}$  (фиг. 3) слой смешения нарастает менее заметно, поскольку давление в струе на протяжении разгонного участка уменьшается. За наименьшим сечением  $d_{min}$  струя начинает расширяться более интенсивно, вследствие смешения с прилегающими слоями жидкости в ЗОТ, и скорость на поверхности струи быстро  
 45 уменьшается. Эксперименты показывают, что оптимальная длина сопла  $l_c$  плюс длина камеры  $L_k$  находится вблизи значения  $l_c + L_k = dc$ , т.е. соответствуют длине разгонного участка струи.

Авторами предлагается устранить образование толстой вялотекущей пленки вокруг

струи за счет укорочения зоны обратных токов в канале сопла, где эта пленка и образуется, а также расположить острую кромку выходного отверстия на разгонном участке струи, в области тонкого слоя смешения.

При этом, следует располагать срез сопла на внутренней поверхности передней крышки камеры. Сопловой срез должен быть плоским. Плоскость соплового среза должна быть ортогональной оси сопла и быть совмещена с плоскостью внутренней стенки передней крышки камеры. На выходе из сопла, за выходной острой кромкой  $90^\circ$ , нужно организовать кольцевой вихрь в застойной зоне.

Режим генерации в устройстве САИ, взятого за прототип, характеризуется наличием семейства мод - режимов устойчивой генерации, характеризующихся определенным числом Струхалия  $Sh=f \cdot L_k/W$ , где  $f$  - частота генерации, грубо можно принять частоту собственных колебаний камеры резонатора,  $L_k$  - длина камеры резонатора,  $W$  - скорость струи. Режим генерации сменяется интервалами тишины при изменении скорости струи (фиг. 4). Это создает дополнительные трудности при работе САИ, поскольку в процессе работы скорость потока немного колеблется, и генерация возникает и исчезает при незначительных колебаниях расхода жидкости.

САИ с коротким соплом и короткой камерой лишен этого недостатка, как мы видим на фиг. 5. Режим генерации так же перескакивает с одной характеристики на другую с другим числом Струхалия. Но в интервале изменения скорости струи  $20 \dots 70$  м/с мы наблюдаем устойчивую генерацию в пределах одной моды, амплитуда которой в несколько раз выше, нежели на фиг. 4.

Устройство для генерирования волн давления в затрубном пространстве нагнетающей скважины (см. фиг. 1) состоит из цилиндрического корпуса 1, передней плоской крышки 2, задней плоской крышки 3, цилиндрического сопла 4 в передней крышке, выходного отверстия с острой кромкой 5 в задней крышке. Камера объемного резонатора представляет собой трубу, заглушенную с обоих торцов плоскими крышками, установленными параллельно друг другу и перпендикулярно оси камеры-резонатора. В первой (по-потoku) крышке камеры выполнено входное сопло, а в задней крышке - выходное отверстие.

Цилиндрический участок сопла заканчивается плоским сопловым срезом с острой выходной кромкой. Плоскость, в которой выполнен сопловой срез, ортогональна оси сопла и совмещена с внутренней плоской стенкой передней крышки, в которой и выполнено сопло.

Выходное отверстие выполнено в задней крышке соосно соплу и имеет острую входную кромку, направленную в сторону сопла.

Устройство установлено на нижнем конце НКТ и его сопло соединено с каналом НКТ, а выпускное отверстие направлено вниз, вдоль перфорации скважины.

Работает устройство для генерирования волн давления в затрубном пространстве скважины следующим образом. При подаче в НКТ ремонтируемой скважины технической сжимаемой жидкости, вся подаваемая жидкость протекает через скважинный акустический излучатель. При этом на выходе из сопла формируется круглая струя жидкости, которая устремляется в выходное отверстие, задевает острую кромку своей возмущенной периферией и в области острой кромки генерируются со строгой периодичностью слабые первичные колебания давления. Поскольку частота генерации первичных колебаний давления соответствует частоте собственных колебаний давления камеры-резонатора, то их амплитуда многократно увеличивается, а за выходным отверстием формируется волна давления. Далее волна распространяется через отверстия перфорации в затрубное пространство.

Отличительной особенностью работы данного устройства является то, что увеличение скорости потока происходит как внутри сопла, так и за соплом, на протяжении камеры резонатора до острой кромки выходного отверстия. Уменьшение давления по длине струи на разгонном участке сдерживает развитие слоя смешения, и струя сохраняет на периферии высокую скорость, поскольку менее интенсивно увлекает с собой окружающую жидкости из ЗОТ. Струя с высокой скоростью на периферии задевает острую кромку выходного отверстия, и при этом возникают локальные возмущения давления в области острой кромки, характеризующиеся более высокой амплитудой колебаний давления, которые усиливаются дополнительно внутри камеры резонатора. В этом случае, интенсивность упругих волн на выходе из САИ становится выше.

При этом, комбинация короткого сопла с короткой камерой резонатора (их совокупная длина соответствует длине разгонного участка струи) обеспечивает устойчивую генерацию с высокой интенсивностью в широком интервале скорости струи.

Таким образом предложены способ и устройство генерирования волн давления в затрубном пространстве нагнетающей скважины, расширяющие выбор известных средств указанного назначения, и обеспечивающие устойчивую генерацию с высокой интенсивностью акустических колебаний в широком интервале скорости струи жидкости при генерировании волн давления в затрубном пространстве в стволе нагнетательной скважины (увеличение интенсивности генерации в САИ) для повышения степени очистки от твердых отложений стенок обсадных труб и отверстий перфорации, декольматации призабойной зоны пласта и увеличения подвижности пластовых флюидов. Способ и устройство позволяют увеличить амплитуду колебаний давления в затрубном пространстве нагнетательной скважины в 3 и более раза.

25

#### (57) Формула изобретения

1. Способ генерирования волн давления в затрубном пространстве нагнетательной скважины, при котором на нижнем конце насосно-компрессорной трубы (НКТ) устанавливают струйный акустический излучатель, состоящий из камеры-резонатора с двумя крышками, сопла с сопловым срезом, выполненного в передней крышке, и выходного отверстия с острой кромкой, выполненного соосно соплу в задней крышке, в котором сопло соединяют с НКТ, а выходное отверстие направляют в затрубное пространство скважины, при этом подают жидкость по НКТ в сопло, формируют в камере-резонаторе в интервале между сопловым срезом и выходным отверстием струю жидкости, характеризующуюся наличием разгонного участка с плавным увеличением скорости струи и последующего участка свободного истечения с плавным расширением струи, и направляют струю жидкости на острую кромку выходного отверстия, генерируют первичные колебания давления в области острой кромки, усиливают эти первичные колебания давления в камере-резонаторе, частота собственных колебаний которой настроена в резонанс с частотой генерации первичных колебаний давления, формируют семейство мод на частоте акустического резонанса, характеризующееся определенным набором чисел Струхала, и создают волны давления за выходным отверстием в затрубном пространстве скважины, отличающийся тем, что разгонный участок струи частично размещают внутри сопла, а оставшуюся часть разгонного участка размещают в камере-резонаторе таким образом, чтобы наименьшее сечение струи  $d_{min}$  находилось в плоскости острой кромки выходного отверстия, при этом семейство мод сводят к единственной моде с высокой интенсивностью, существующей в широком интервале числа Струхала.

2. Струйный акустический излучатель для генерирования волн давления в потоке жидкости, представляющий собой полое тело вращения и состоящий из камеры-резонатора, ограниченной двумя плоскими крышками, цилиндрического сопла, представляющего собой сквозное отверстие в центре передней крышки, и выходного  
5 отверстия с острой входной кромкой, выполненного соосно соплу в центре задней крышки, причем сопло заканчивается плоским сопловым срезом, ортогональным оси сопла и расположенным на внутренней стенке передней крышки, а плоскость входа в выходное отверстие ортогональна оси выходного отверстия и расположена на внутренней стенке задней крышки, отличающийся тем, что длина цилиндрического  
10 сопла  $l_c$  примерно равна половине его диаметра  $d_c$  ( $l_c=0,5\dots0,7 d_c$ ), и длина камеры резонатора  $L_k$  также примерно равна половине диаметра сопла ( $L_k=0,4\dots0,5 d_c$ ), а выходное отверстие выполнено диаметром  $d_{вых}$  равным  $1,7\dots1,8$  диаметра сопла  $d_c$  ( $d_{вых}=1,7\dots1,8 d_c$ ).

15

20

25

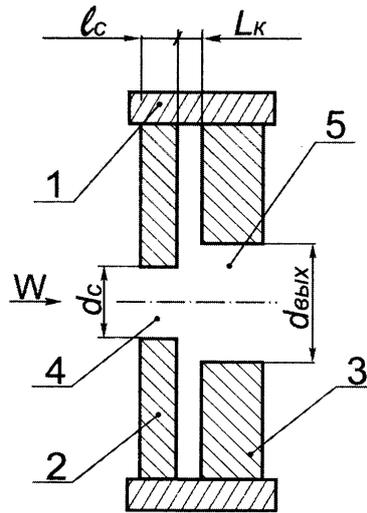
30

35

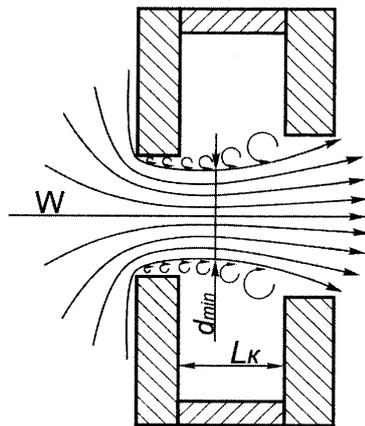
40

45

1

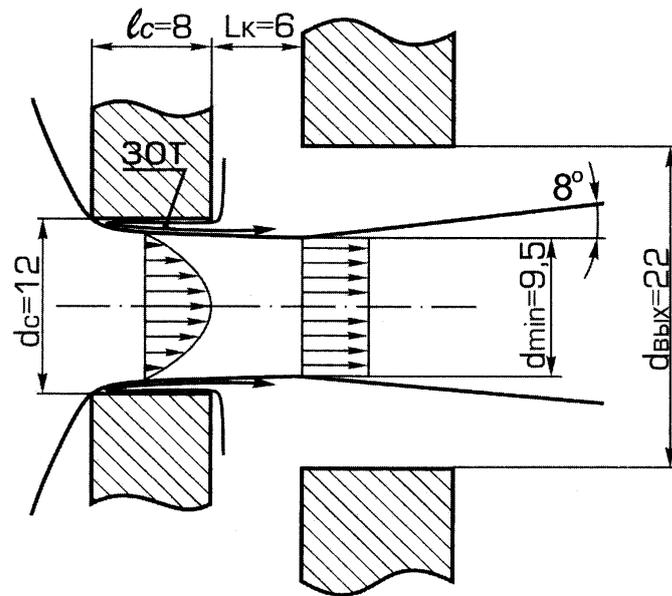


Фиг. 1 Схема камеры струйного акустического излучателя с цилиндрическим соплом для генерирования волн давления в затрубном пространстве в соответствии с заявляемым способом

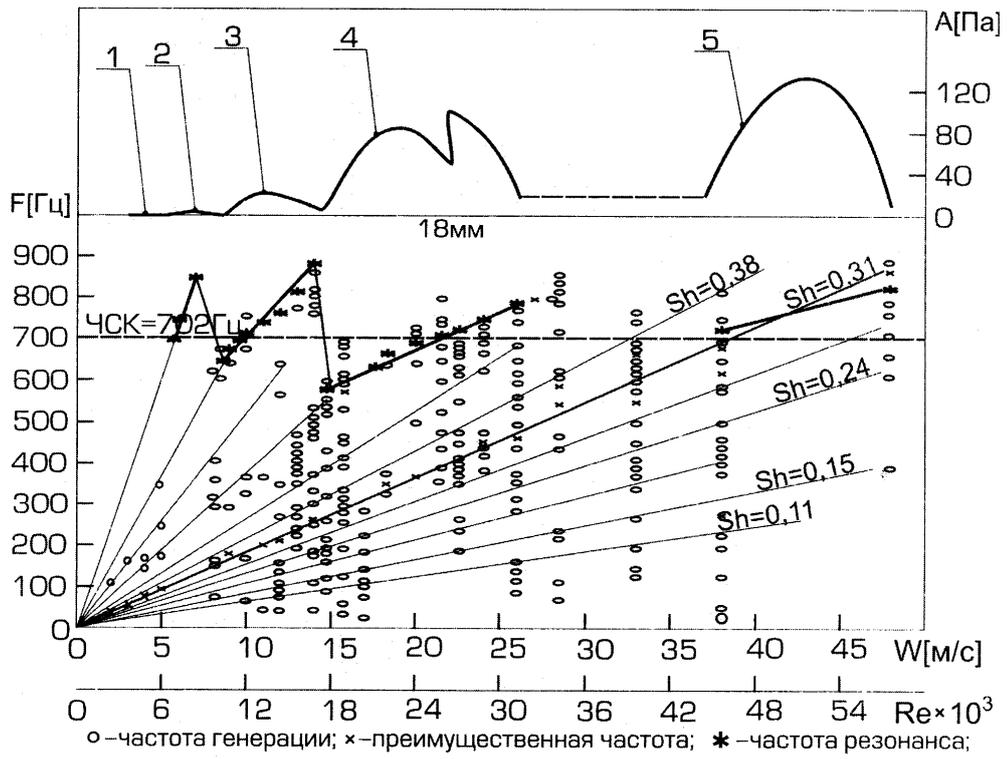


Фиг. 2 Схема заполнения струёй камеры струйного акустического излучателя

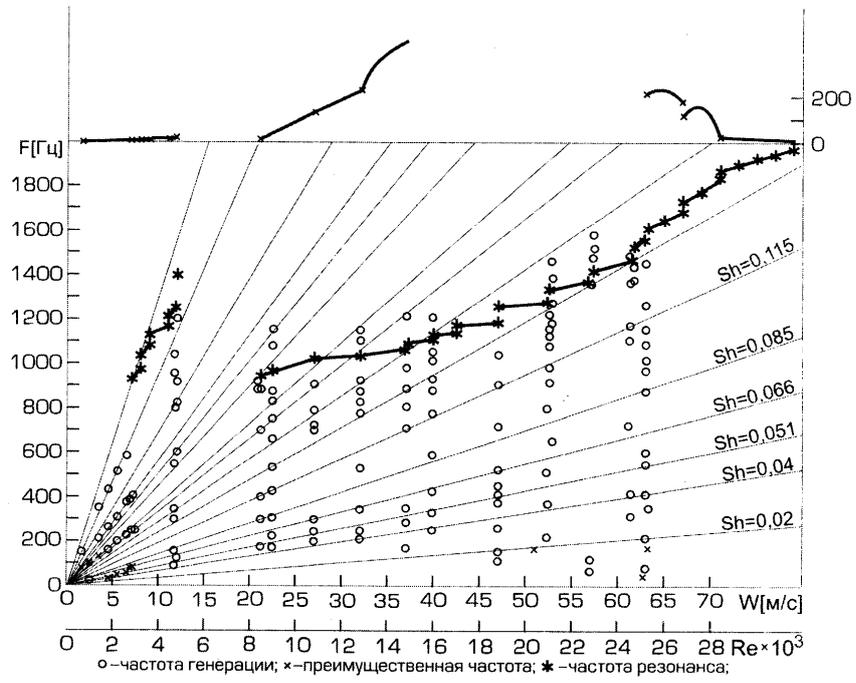
2



Фиг. 3 Формирование зоны обратных токов в цилиндрическом канале сопла и образование вялотекущей плёнки, окружающей струю



Фиг. 4 “Модовая картинка”, результаты эксперимента с САИ, имеющего длинное сопло и длинную камеру резонатора



Фиг. 5 “Модовая картинка”, результаты эксперимента с САИ, имеющего короткое сопло и короткую камеру резонатора