

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: по данным на 09.03.2016 - действует
Пошлина: учтена за 6 год с 21.10.2015 по 20.10.2016(21), (22) Заявка: **2010143043/03, 20.10.2010**(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
20.10.2010

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **20.10.2010**(43) Дата публикации заявки: **27.04.2012**(45) Опубликовано: [20.05.2013](#)(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2100567 C1, 27.12.1997. SU 1162942 A, 23.06.1985. SU 1444505 A1, 15.12.1988. EA 13276 B1, 30.04.2010. EA 13481 B1, 30.04.2010. GB 2006002726 A1, 20.07.2006. Справочник по капитальному ремонту нефтяных и газовых скважин. - М.: Недра, 1973, с.149-150.**

Адрес для переписки:

634050, г.Томск, пр. Ленина, 36, НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета (НИИ ПММ ТГУ), директору А.А. Глазунову

(72) Автор(ы):

**Барсуков Виталий Дементьевич (RU),
Минькова Наталья Петровна (RU)**

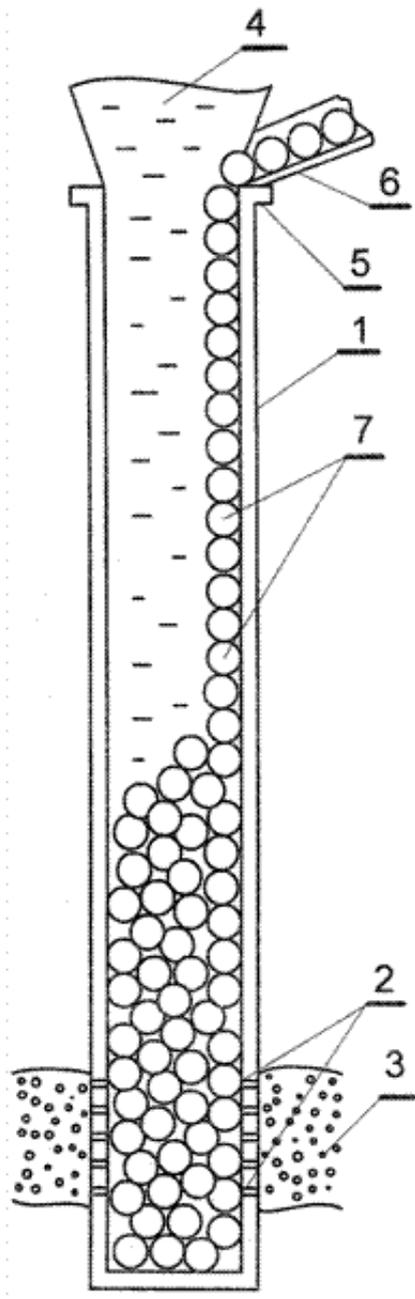
(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный университет" (ГОУ ВПО ТГУ) (RU)

(54) СПОСОБ Понижения Дебита Аварийных Фонтанирующих Скважин

(57) Реферат:

Изобретение относится к нефтедобывающей промышленности и может быть использовано при ликвидации аварий на скважинах с открытым фонтанированием, в том числе на морских скважинах. Способ понижения дебита аварийных фонтанирующих скважин заключается в том, что непосредственно в эксплуатационную часть скважины подают погружные элементы из материала, имеющего плотность больше плотности нефти до образования пробки на забое. При этом подачу ведут либо шаров из цельного минерала или металла, либо изготовленных из такого же материала удлинённых тел вращения обтекаемой формы со смещённым центром тяжести вдоль оси. Диаметр шаров и диаметр миделева сечения удлинённых тел вращения выбирают больше минимального значения, которое определяют из решения приведённого математического выражения и меньше максимального значения, которое определяют из решения приведённого математического выражения. При этом процесс ведут до полного заполнения скважины или до



Фиг.1

достижения приемлемого размера дебита. 4 з.п. ф-лы, 2 ил.

Изобретение относится к нефтедобывающей промышленности и может быть использовано при ликвидации аварий на скважинах с открытым фонтанированием, в том числе и на морских скважинах.

Известен способ плавного глушения скважины, реализуемого при неконтролируемом выбросе пластовых флюидов, переходящее к открытому фонтанированию в процессе бурения [1]. Известный способ заключается в том, что при зарождении выбросов герметизируют устье скважины, затем в скважину закачивают новый утяжеленный буровой раствор, вытесняющий более легкий старый раствор, разбавленный в кольцевом пространстве пластовыми флюидами, и после этого на забое поддерживают давление, превышающее пластовое проявляющего пласта и не допускающего дальнейшего прорыва пластовых флюидов в скважину.

Недостатком известного способа является обязательное наличие устьевого оборудования, причем в исправном состоянии. При открытом фонтанировании реализация способа представляется невозможной.

Наиболее близким по технической сущности представляется способ создания искусственных глинистых и глинопесчаных пробок в эксплуатационной колонне, предложенный в работе [2]. В известном способе из сырой глины с небольшой примесью песка приготавливают погружные элементы в виде шаров диаметром 4...5 см в количестве, необходимом для создания пробки определенной мощности. Погружные элементы равномерно по 80-100 штук в минуту бросают непосредственно в эксплуатационную колонну. После получасового перерыва в скважину спускают 48-мм штангу длиной 5...6 м и шаблон нормального диаметра, при помощи которых утрамбовывают пробку на забое.

Недостатком известного способа является низкая эффективность, связанная с тем, что самопогружение глиняных погружных элементов возможно только при низких дебитах. При высоких дебитах, которые характерны для открытого фонтанирования, известный способ не дает положительного результата.

Ставилась задача повысить эффективность способа воздействия на аварийные скважины, включая понижение дебита при фонтанировании большой интенсивности.

Поставленная задача решается тем, что в известном способе понижения дебита фонтанирующих скважин путем создания пробки, заключающимся в том, что непосредственно в эксплуатационную часть скважины подают погружные элементы из материала, имеющего плотность больше плотности нефти до образования пробки на забое, подачу ведут либо шаров из цельного минерала, либо изготовленных из такого же материала удлиненных тел вращения обтекаемой формы со смещенным центром тяжести вдоль оси, при этом диаметр шаров и диаметр миделева сечения удлиненных тел вращения выбирают больше минимального значения, которую определяют из решения приближенного уравнения

$$d_{\min}^5 - 2D^2 d_{\min}^3 + D^4 d_{\min} - \frac{12\xi\rho_n Q_0^2 (1 + \alpha)^2}{\pi^2 g (\rho - \rho_n)} = 0,$$

где d_{\min} - минимальный диаметр шаров, м;

D - диаметр скважины, м;

ξ - коэффициент сопротивления;

ρ_n - плотность нефти, кг/м³;

Q_0 - начальный дебит нефти фонтанирующей скважины, м³/с;

α - газовое число (отношение объемных расходов газа и нефти);

g - ускорение свободного падения, м/с²;

ρ - плотность материала шара, кг/м³,

и меньше максимального значения, которое определяют из решения приближенного уравнения

$$d_{\max}^3 - (4A + 2D)d_{\max}^2 + (4AD + 2D^2)d_{\max} - AD^2 = 0,$$

$$A = \frac{54\rho_n Q_0^2 (1 + \alpha)^2}{\pi^2 D^3 g (\rho - \rho_n)}$$

где d_{\max} - максимальный диаметр шаров, м, причем процесс ведут до полного заполнения скважины или до достижения приемлемого размера дебита.

Для удлиненных тел вращения могут выбирать форму в виде усеченного конуса, боковая поверхность которого сопряжена с соответствующими частями сфер по торцам.

Диаметр шаров и миделевого сечения удлиненных тел вращения могут выбирать в пределах неравенства

$$D/3 - \Delta \leq d < D/3,$$

где d - диаметр шаров и удлиненных тел вращения, м;

Δ - допуск на диаметр шаров и удлиненных тел вращения при их изготовлении, м.

При заполнении нижнего слоя могут использовать погружные элементы из свинца или олова, а их деформацию обеспечивать заполнением погружных элементов из чугуна или стали.

Процесс могут вести в два или более этапов, используя на первых этапах более массивные погружные элементы, а по мере понижения дебита применять менее массивные погружные элементы.

Использование погружных элементов из цельного минерала или металла расширяет диапазон начальных дебитов нефти, при которых возможно их самопогружение и, соответственно, образование шарового слоя, препятствующего интенсивному выбросу пластовых флюидов. Использование удлиненных тел вращения обтекаемой формы в сочетании со смещенным центром тяжести вдоль оси позволяет увеличить силу тяжести в расчете на единицу площади миделева сечения и тем самым увеличить проникающую способность погружных элементов (смещение центра тяжести обеспечивает в процессе погружения в нефтегазовую среду вертикальную ориентацию погружных элементов). Выбор используемых погружных элементов по размерам диаметров шаров и диаметров миделева сечения удлиненных тел вращения между нижней и верхней границами, которые определяют из решения приведенных приближенных уравнений, задает условия работоспособности предлагаемого способа для материалов различной плотности и различных дебитов. Проведение процесса до полного заполнения скважины или до достижения приемлемого размера дебита обеспечивает достижение необходимого положительного результата.

Выбор формы удлиненных тел вращения в виде усеченного конуса, боковая поверхность которого сопряжена с соответствующими частями сфер по торцам, позволяет увеличить силу тяжести в расчете на площадь миделева сечения и увеличить тем самым проникающую способность погружных элементов.

Выбор диаметров погружных элементов в пределах приведенного неравенства представляется оптимальным, такие погружные элементы удобны в обращении, позволяют сократить время заполнения скважины при достижении достаточно плотной упаковки.

Заполнение нижнего слоя погружными элементами из свинца, олова или из подходящих мягких сплавов и обеспечение их деформации заполнением погружными элементами из чугуна или стали позволяют удешевить операции.

Ведение процесса в два или более этапов, используя на первых этапах более массивные погружные элементы, а после понижения дебита на предыдущем этапе применяя менее массивные погружные элементы, позволяет удешевить операции.

Сущность изобретения поясняется чертежами, где на фиг.1 схематически представлена скважина, частично заполненная шарами; на фиг.2 аналогичная скважина, в которой для заполнения использованы удлиненные тела вращения.

Реализация способа осуществляется следующим образом. В аварийной скважине 1 (Фиг.1, 2) имеется перфорация 2, сообщающаяся с продуктивным пластом 3. Последний является источником фонтанирующей нефти 4. Для понижения дебита к устью скважины 5 пристыковывают направляющую 6, по которой подают либо шары 7 (Фиг.1), либо удлиненные тела вращения 8 (Фиг.2).

В подводных условиях при небольшой глубине подачу можно вести с обеспечивающего судна, а при большой глубине целесообразно использовать необитаемый подводный аппарат. Процесс подачи ведут до полного заполнения скважины или до достижения приемлемого дебита. Представляется, что подготовка описанных операций может проводиться в рамках обычного проектирования без специальных изобретательских решений.

Ниже приведено теоретическое обоснование работоспособности предлагаемого способа.

Сила тяжести F_T , приводящая к погружению массивного шара в жидкой среде, может быть определена из соотношения

$$F_T = \frac{\pi d^3 g}{6} (\rho - \rho_n), \quad (1)$$

где d - диаметр шара, м;

g - ускорение свободного падения, м/с^2 ;

ρ - плотность материала шара, кг/м^3 ;

ρ_H - плотность жидкости, кг/м^3 .

Соответствующая сила $F_{\text{сопр}}$, препятствующая этому движению, может быть выражена известным уравнением закона сопротивления

$$F_{\text{сопр}} = \xi \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_H C_{\text{погр}}^2}{2}, \quad (2)$$

где $C_{\text{погр}}$ - скорость погружения шара, м/с ;

ξ - коэффициент сопротивления.

Из условия равенства $F_T = F_{\text{сопр}}$ можно получить соотношение

$$C_{\text{погр}} = \sqrt{\frac{4g(\rho - \rho_H)d}{3\xi\rho_H}}, \quad (3)$$

из которого видно, что скорость погружения шара в неподвижной жидкости пропорциональна диаметру и разности плотностей в степени 0,5. Однако в фонтанирующей скважине нефть не является неподвижной. Скорость ее движения может быть оценена исходя из размера дебита. При известном диаметре скважины скорость движения нефтегазовой смеси на выходе с учетом перекрытия шаром части проходного сечения равна

$$C_0 = \frac{4Q_0(1 + \alpha)}{\pi(D^2 - d^2)}, \quad (4)$$

где Q_0 - начальный дебит нефти фонтанирующей скважины, $\text{м}^3/\text{с}$;

C_0 - начальная скорость движения нефти на выходе из скважины, м/с ;

D - диаметр скважины, м;

α - газовое число (отношение объемных расходов газа и нефти);

ξ - коэффициент сопротивления.

Для того чтобы массивный шар мог погружаться в восходящем потоке нефти фонтанирующей скважины, должно соблюдаться условие

$$C_{\text{погр}} > C_0. \quad (5)$$

С учетом (3) и (4) имеем

$$\frac{4g(\rho - \rho_H)d}{3\xi\rho_H} > \frac{4Q_0(1 + \alpha)}{\pi(D^2 - d^2)}. \quad (6)$$

Из полученного строгого неравенства можно определить минимальный диаметр шаров d_{min} , при превышении которого они могут самопогружаться. Для вычисления d_{min} соотношение (6) допустимо считать равенством. Тогда, после несложных преобразований, оно примет вид

$$d_{\text{min}}^5 - 2D^2 d_{\text{min}}^3 + D^4 d_{\text{min}} - \frac{12\xi\rho_H Q_0^2 (1 + \alpha)^2}{\pi^2 g(\rho - \rho_H)} = 0. \quad (7)$$

Ввиду турбулентности фонтанирующего потока коэффициент ξ в соотношении (7) может быть принят равным 0,44 [3, с.99], что соответствует автомодельному режиму движения. Обоснованность такого значения коэффициента подтверждается диапазоном изменения числа Рейнольдса от 22×10^3 до 43×10^4 . Расчет проводился для диаметров шаров от 2 до 8,3 см, скорости нефти на выходе от 1,27 до 6,09 м/с при плотности нефти 850 кг/м и ее динамической вязкости 10^{-3} Па·с. При этом для получения более надежных оценок плотность и вязкость взяты для чистой нефти, а не нефтегазовой смеси (в чистой нефти погружение шаров более затруднено).

При увеличении диаметра шаров, с одной стороны, при прочих равных условиях их способность к самопогружению возрастает, с другой стороны, начинает проявляться влияние стенок скважины. За счет большего перекрытия проходного сечения возрастает местное сопротивление при обтекании шара. Поэтому существует верхний предел, при котором еще возможно самопогружение.

Для оценки верхнего предела для диаметра шаров d_{\max} следует учитывать, что местное сопротивление создается в кольцевом зазоре между шаром и стенками скважины. Будем считать местное сопротивление равным сумме сопротивлений с внезапным сужением и внезапным расширением потока. При внезапном расширении местное сопротивление ξ_M можно считать равным [3, с.94]

$$\xi_M = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2, \quad (8)$$

где S_1 - площадь сечения до расширения потока, м²;

S_2 - площадь сечения после расширения потока, м².

Местное сопротивление при внезапном расширении может измениться от 0 до 1, в то время как при внезапном стократном сужении не превосходит 0,5. Поэтому для упрощения последующих выкладок местное сопротивление принимаем равным в 1,5 раза большим ξ_M из (8).

Тогда перепад давления, связанный с обтеканием шара, может быть определен следующим образом

$$\Delta P = 1,5 \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \frac{\rho_H C_0^2}{2}. \quad (9)$$

Этот перепад давления уравнивается весом шара из соотношения (1), отнесенного к площади его сечения

$\frac{\pi d_{\max}^2}{4}$. Приравняв перепад давления ΔP к относительному весу шара и конкретизируя соответствующие параметры, получим

$$1,5 \left[1 - \frac{\pi D(D - d_{\max})}{\pi D^2}\right]^2 \frac{\rho_H}{2} \left[\frac{4Q_0(1 + \alpha)}{\pi D(D - d_{\max})}\right]^2 = \frac{4\pi d_{\max}^3 g(\rho - \rho_H)}{6\pi d_{\max}^2}. \quad (10)$$

Здесь для упрощения выкладок площадь кольцевого зазора определена произведением длины окружности на ширину зазора.

После преобразований равенства (10) получаем уравнение для определения максимального диаметра шара d_{\max} , ниже которого появляется способность к самопогружению при заданных дебите и плотности шара

$$d_{\max}^3 - (4A + 2D)d_{\max}^2 + (4AD + 2D^2)d_{\max} - AD^2 = 0, \quad (11)$$

$$A = \frac{54\rho_H Q_0^2(1 + \alpha)^2}{\pi^2 D^3 g(\rho - \rho_H)},$$

где

Решение уравнения (7) и (11) наиболее просто можно получить на персональном компьютере, используя, например, систему Mathcad 11.

В качестве примеров ниже приведен расчет диаметров шаров для фонтанирующей скважины диаметром 0,168 м с плотностью нефти 850 кг/м³ для различных дебитов. При этом, поскольку диаметр шаров мал, для удобства расчетов целесообразно использовать систему СГС.

Вариант 1. Дебит 5×10^3 см³/с (432 м³/сут).

Для понижения такого размера дебита можно использовать шары из гранита или глины (как в прототипе), имеющих плотность $\rho = 2,64$ г/см³. Минимальный диаметр d_{\min} таких шаров, при превышении которого обеспечивается их самопогружение при данном дебите, согласно решению уравнения (7) составляет $d_{\min} = 2,10$ см. Для верхней границы из решения уравнения (11) получаем $d_{\max} = 7,73$.

Вариант 2. Дебит 10×10^3 см³/с (864 м³/сут).

Минимальный диаметр d_{\min} для глиняных или гранитных шаров оказывается равным 21,4 см. Поэтому используемые в прототипе шары диаметром 4... 5 см при таком дебите будут выброшены потоком нефтегазовой смеси, т.е. изложенный в прототипе способ в этих условиях окажется неработоспособным.

Согласно предлагаемому способу для данного дебита следует использовать более массивные шары. Возможно использование шаров, например, из магнетита ($\rho = 4,9$ г/см³). При этом минимальный диаметр составляет $d_{\min} = 4,06$ см, а максимальный $d_{\max} = 7,90$ см. Для данного дебита могут быть также использованы чугунные или стальные ($\rho = 7,8$ г/см³) шары, для которых, ввиду повышенной плотности, границы по диаметру раздвигаются от $d_{\min} = 2,17$ см до $d_{\max} = 9,19$ см.

Вариант 3. Дебит 14×10^3 см³/с (1210 м³/сут).

Для шаров из магнетита для данного дебита минимальный диаметр оказывается больше диаметра скважины. Поэтому для данных условий необходимо использовать чугунные или стальные шары, для которых $d_{\min} = 4,92$ см, $d_{\max} = 7,93$ см (в связи с увеличением дебита границы сужаются).

Вариант 4. Дебит 16×10^3 см³/с (1382 м³/сут).

Стальные шары должны иметь минимальный диаметр порядка 8,5 см. В этих условиях целесообразно использовать свинцовые шары ($\rho = 11,3$ г/см³), для которых $d_{\min} = 4,02$ см, $d_{\max} = 8,09$ см.

Вариант 5. Дебит 20×10^3 см³/с (1728 м³/сут).

Для данного размера дебита минимальный диаметр свинцовых шаров превосходит диаметр скважины. По плотности подходит золото ($\rho = 19300$ кг/м³). Минимальный диаметр таких шаров составляет $d_{\min} = 3,45$ см, максимальный $d_{\max} = 7,86$ см.

Вариант 6. Дебит 24×10^3 см³/с (10370 м³/сут).

Для такого высокого дебита для самопогружения шаров даже плотность золота оказывается недостаточной (для золота $d_{\min} = 20,5$ см). В данном случае по плотности подходит платина ($\rho = 21,4$ г/см³). Для шаров из платины минимальный диаметр составляет $d_{\min} = 5,6$ см, максимальный $d_{\max} = 7,95$ см.

По поводу золота и платины авторы представляют малую вероятность их использования. Однако расчеты приведены для полноты освещения решения проблемы во всем диапазоне дебитов, которые могут быть понижены с использованием предлагаемого способа. Вместе с тем, следует сослаться на данные средств массовой информации об аварии на скважине в Мексиканском заливе. Для понижения дебита бурили другую скважину, а тем временем ущерб возрастал и по разным оценкам составил от 6 до 32 млрд долларов. Как будет показано далее, заполнение скважины диаметром 168 мм на высоту 250 м шарами из золота позволяет понизить дебит в 9,25 раз. Стоимость таких шаров оценивается в 2,1 млрд долларов.

Для количественной оценки уменьшения дебита при заполнении скважины шарами воспользуемся сравнением гидравлических сопротивлений.

Движение нефти в скважине без шаров может быть охарактеризовано уравнением Бернулли

$$P_{пл} = H \rho_H g + \frac{\rho_H C_0^2}{2} + P_y + \Delta P_{тр}, \quad (12)$$

где $P_{пл}$ - пластовое давление, МПа;

H - глубина скважины, м;

C_0 - начальная осредненная скорость движения нефти на выходе из скважины, м/с;

P_y - давление у устья скважины, МПа;

$\Delta P_{тр}$ - потери давления на трение о стенки скважины, МПа.

Аналогичное уравнение можно записать для скважины, заполненной шарами, в пренебрежении трения о стенки скважины

$$P_{пл} = H \rho_H g + \frac{\rho_H C^2}{2} + P_y + \Delta P_{шар}, \quad (13)$$

где C - «эффективная» скорость движения нефти (отношение мгновенного значения дебита к площади поперечного сечения скважины), м/с;

$\Delta P_{шар}$ - падение давления в скважине, обусловленное наличием шарового слоя, МПа.

Вычтя из первого уравнения второе, получим связь для оценки отношения скорости движения нефти до и после заполнения скважины шарами

$$\frac{\rho_H (C_0^2 - C^2)}{2} + \Delta P_{тр} - \Delta P_{шар} = 0. \quad (14)$$

Для оценки потери давления на трение о стенки скважины $\Delta P_{тр}$ можно

воспользоваться известным выражением для турбулентного движения

$$\Delta P_{тр} = \lambda \frac{H \rho_H C_0^2}{D} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \frac{H \rho_H C_0^2}{D}, \quad (15)$$

где λ - коэффициент трения для автомодельного движения, равный $\frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}$;

Re - число Рейнольдса, равное $\frac{DC_0}{\nu_c}$;

ν_c - кинематическая вязкость нефтегазовой смеси, м²/с.

Для оценки потери давления при движении через шаровой слой скважины можно воспользоваться методами химической технологии при расчете движения жидкости через неподвижные зернистые среды. В работе [3, с.104] приведено соотношение для определения потери давления через неподвижный зернистый слой

$$\Delta P_{ш} = \lambda_{ш} \frac{h \rho_H C^2}{d_з}, \quad (16)$$

где h - высота зернистого (шарового) слоя, м.

Здесь в отличие от движения по трубам $\lambda_{ш}$ отражает не только сопротивление трения, но и местное сопротивление, которое обусловлено зигзагообразным движением жидкости между шарами. Для автомодельного движения ($Re > 7000$)

$\lambda_{ш} = 2,34$ [3, с.107]. Кроме того, в (21) введен эквивалентный диаметр $d_э$, соответствующий суммарному проходному сечению каналов шарового сечения. Для определения $d_э$ вводят понятие порозности ϵ , определяемое отношением

$$\epsilon = \frac{W - W_0}{W}, \quad (17)$$

где W - объем шарового слоя, m^3 ;

W_0 - объем, занимаемый шарами, m^3 .

Сопротивление шарового слоя характеризуется размером его элементов, возрастая при увеличении их удельной поверхности и уменьшаясь при росте свободного объема. Отсюда следует, что наибольшей эффективностью для понижения дебита скважины обладают шары минимального диаметра с максимально плотной упаковкой.

Однако на практике работа с мелкими шарами может оказаться слишком длительной процедурой (поскольку подачу необходимо осуществлять последовательно по одному), поэтому считаем возможным использовать шары больших

диаметров. Представляется, что оптимальным размером шаров будет $\frac{D}{3}$ (с уменьшением на допуск Δ , необходимый при изготовлении), обеспечивающей достаточно плотную упаковку. В этом случае в сечении скважины вписываются семь шаров (точно). В дальнейших выкладках для конкретизации аналитических выражений диаметр шаров принят 5,6 см, т.е. 1/3 диаметра скважины 16,8 см.

Для сформулированных условий порозность можно определить следующим образом. Заполнение скважины шарами

диаметром $\frac{D}{3}$ можно представить в виде «пустотелого» кольцевого «цилиндра» из 6 шаров в поперечном сечении и центрального «стержня», составленного h/d шаров. Поскольку смежные «кольца», каждый из шести шаров, относительно друг друга (по определенному направлению), то их общая высота оказывается меньше суммы двух

$$k = \frac{\sqrt{3}}{3}$$

диаметров. Из геометрических соображений можно определить коэффициент «усадки» k , который равен $\frac{\sqrt{3}}{3}$. Тогда количество шаров в кольцевом «цилиндре» составит величину n , равную

$$n = \frac{6h}{\frac{\sqrt{3}}{2}d} = \frac{12h}{d\sqrt{3}}$$

Общее количество шаров N равно

$$N = \frac{h}{d} \left(1 + \frac{12}{\sqrt{3}}\right) \approx 7,94 \frac{h}{d} \quad (18)$$

Учитывая, что объем каждого шара равен $\frac{\pi d^3}{6}$, а объем скважины, занятый шарами, составляет $\frac{\pi D^3 h}{4}$, то порозность ϵ определится выражением

$$\epsilon = \frac{W_{скв} - W_{ш}}{W_{скв}} = \frac{0,25\pi D^2 h - \frac{7,94h}{d} \pi \frac{d^3}{6}}{0,25\pi D^2 h}, \quad (19)$$

$$d = \frac{D}{3}$$

из которого следует, что при $d = \frac{D}{3}$ величина ϵ составляет 0,413.

Эквивалентный диаметр, определяемый отношением учетверенной поверхности к смоченному периметру в приложении к зернистому (шаровому) слою, определяется выражением [3, с.106]

$$d_{\text{э}} = \frac{2\varepsilon d}{3(1-\varepsilon)} = \frac{2 \times 0,413 \times 0,056}{3 \times (1-0,413)} \approx 0,026 \text{ м.} \quad (20)$$

Подставив соотношения (15), (16), (20) в выражение (14), получим уравнение для определения эффективной (расходной) скорости движения нефтегазовой смеси С при заполнении скважины шарами на высоту h

$$\frac{\rho_{\text{H}}(C_0^2 - C^2)}{2} = \frac{2,34 \times 3 \times (1-\varepsilon) h \rho_{\text{H}} C^2}{2 \times 2 \times \varepsilon \times d} - \frac{0,316 \times H \rho_{\text{H}} C_0^2}{2D \text{Re}^{0,25}}. \quad (21)$$

Отсюда после несложных преобразований получим окончательное соотношение

$$\frac{C_0}{C} = \sqrt{\frac{1 + \frac{7,02 \times (1-\varepsilon)}{2\varepsilon} \times \frac{h}{d}}{1 + \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}} \times \frac{H}{D}}}. \quad (22)$$

Степень понижения дебита оценим на примере использования свинцовых шаров при начальном дебите нефти, равном $16 \times 10^3 \text{ см}^3/\text{с}$ ($1382 \text{ м}^3/\text{сут}$). Скорость на выходе составляет $4,06 \text{ м/с}$.

Для подсчета числа Рейнольдса в соотношении (20) необходимо определить кинематическую вязкость нефтегазовой смеси ν_c . Для более надежной оценки эффективности предложенного способа в числе Рейнольдса необходимо использовать кинематическую вязкость не чистой нефти, а нефтегазовой смеси с учетом газовой составляющей. Согласно [4, с.203] кинематическая вязкость в числе Рейнольдса равна

$$\nu_c = \frac{Q_0 + Q_{\text{г}}}{Q_{\text{г}}} \nu_{\text{г}},$$

где $Q_{\text{г}}$ - объемный расход газа, $\text{м}^3/\text{с}$;

$\nu_{\text{г}}$ - кинематическая вязкость газа, $\text{м}^2/\text{с}$.

Для рассматриваемого примера для газового числа $\alpha = 4$ имеем

$$\nu_c = \frac{(16 + 64) \times 10^3}{64 \times 10^3} \nu_{\text{г}} = 1,25 \times 16,8 \times 10^{-6} = 21,8 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Здесь в качестве газа выбран метан, для которого динамическая вязкость равна $12,6 \times 10^{-6} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$ [5, с.275], плотность - $0,75 \text{ кг}/\text{м}^3$ [5, с.57], $\nu_{\text{г}} = 2,6 \times 10^6 / 0,72 = 16,8 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Критерий Рейнольдса в соотношении (22) с учетом (4) определится следующим образом

$$\text{Re} = \frac{C_0 d}{\nu_c} = \frac{4Q_0(1+\alpha)d}{\pi(D^2 - d^2)\nu_c} = \frac{4 \times 0,016 \times (1+4) \times 0,056}{3,14 \times (0,168^2 - 0,056^2) \times 10^{-6}} = 14,0 \times 10^3$$

Подставив необходимые численные значения параметров в (17) для $h=H=1500 \text{ м}$, имеем

$$\frac{C_0}{C} = \sqrt{\frac{1 + \frac{2,34 \times 3 \times (1-0,413) \times 1500}{2 \times 0,413 \times 0,056}}{1 + \frac{0,316 \times 1500}{14000^{0,25} \times 0,168}}} \approx 22,7.$$

Таким образом, скорость нефтегазовой смеси уменьшится в 22,7 раза, что обеспечит дебит $705 \text{ см}^3/\text{с}$ вместо $16000 \text{ см}^3/\text{с}$. При заполнении скважины наполовину дебит уменьшится в 16,0 раз, а при заполнении шарами скважины на высоту 250 м уменьшение составит 9,25 раз. Если использовать шары диаметром 4,1 см, то при полном заполнении

скважины дебит уменьшится в 26,5 раза.

В случае использования материала шаров с низкими прочностными характеристиками и с достаточной пластичностью типа свинца, олова или подобного сплава при заполнении ими скважины появляется дополнительный эффект уменьшения порозности. Этот эффект связан с деформацией шаров, которые при большой нагрузке будут приобретать форму, напоминающую пчелиные соты. Для оценки критической высоты шарового слоя, при котором начинается деформация, можно воспользоваться следующим соотношением

$$h = \frac{\sigma_{сж}}{\rho g(-\varepsilon + 1)},$$

где $\sigma_{сж}$ - предел прочности на сжатие материала шаров, Н/м².

Для свинцовых шаров $\sigma_{сж}=1,76 \times 10^7$ Н/м² [6, с.499] при порозности 0,413 критическая высота шарового слоя составит

$$h = \frac{1,76 \times 10^7}{11300 \times 9,81 \times (-0,413 + 1)} = 270 \text{ м.}$$

При превышении такой высоты в несколько раз можно ожидать, что шары кардинально изменяют свою форму, и заполнение скважины окажется сплошным (по крайней мере, в нижней ее части). В этом случае дебит будет близок к нулю или выход нефти полностью прекратится.

Возможен комбинированный вариант глушения скважины путем создания деформированного слоя свинцовых шаров за счет нагрузки, создаваемой стальными шарами. Последние могут быть поданы после уменьшения дебита за счет создания слоя из свинцовых шаров.

Максимальный темп подачи шаров зависит от их диаметра и фактической скорости самопогружения. Например, свинцовые шары согласно (3) без встречного потока нефти погружались бы со скоростью 4,52 м/с. Однако фактическая скорость самопогружения равна разности 4,52-4,06=0,464 м/с. Максимальный темп подачи шаров составит 0,464/0,056≈ 8 шт./с. Из соотношения (18) следует, что количество шаров, необходимое для заполнения скважины на высоту 250 м, составляет 35446 штук. При подаче шаров в темпе 8 штук в секунду необходимое время равно 35446/8≈ 4431 с≈ 74 мин. При подаче по одному шару в секунду потребуется время около 10 часов.

Источники информации

1. Аникиев К.А. Прогноз сверхвысоких пластовых давлений и совершенствование глубокого бурения на нефть и газ. - Л.: Изд-во Недр, 1971. С.116.
2. Справочник по капитальному ремонту нефтяных и газовых скважин. - М.: Недр, 1973. - 149 с.
3. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Изд. доп., перераб. - М.: Химия, 1971. - 784 с.
4. Справочная книга по добыче нефти/Под ред. Гиматудинова. - М.: Недр, 1974. - 704 с.
5. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И.К.Кикоина. - М.: Атомиздат, 1976. - С.56-57.
6. Свойства элементов / Под ред. Г.В.Самсонова, Часть 1: Физические свойства. - М.: Metallургия, 1976. - 499 с.

Формула изобретения

1. Способ понижения дебита аварийных фонтанирующих скважин, заключающийся в том, что непосредственно в эксплуатационную часть скважины подают погружные элементы из материала, имеющего плотность больше плотности нефти до образования пробки на забое, отличающийся тем, что подачу ведут либо шаров из цельного минерала или металла, либо изготовленных из такого же материала удлиненных тел вращения обтекаемой формы со смещенным центром тяжести вдоль оси, при этом диаметр шаров и диаметр миделева сечения удлиненных тел вращения выбирают больше минимального значения, которое определяют из решения приближенного уравнения

$$d_{\min}^5 - 2D^2 d_{\min}^3 + D^4 d_{\min} - \frac{12\xi\rho_n Q_0^2 (1 + \alpha)^2}{\pi^2 g (\rho - \rho_n)} = 0,$$

где d_{\min} - минимальный диаметр шаров, м;

D - диаметр скважины, м;

ξ - коэффициент сопротивления;

ρ_n - плотность нефти, кг/м³;

Q_0 - начальный дебит нефти фонтанирующей скважины, м³/с;

α - газовое число (отношение объемных расходов газа и нефти);

g - ускорение свободного падения, м/с²;

ρ - плотность материала шара, кг/м³,

и меньше максимального значения, которое определяют из решения приближенного уравнения

$$d_{\max}^3 - (4A + 2D)d_{\max}^2 + (4AD + 2D^2)d_{\max} - AD^2 = 0,$$

где
$$A = \frac{54\rho_n Q_0^2 (1 + \alpha)^2}{\pi^2 D^3 g (\rho - \rho_n)},$$

причем процесс ведут до полного заполнения скважины или до достижения приемлемого размера дебита.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что для удлиненных тел вращения выбирают форму в виде усеченного конуса, боковая поверхность которого сопряжена с соответствующими частями сфер по торцам.

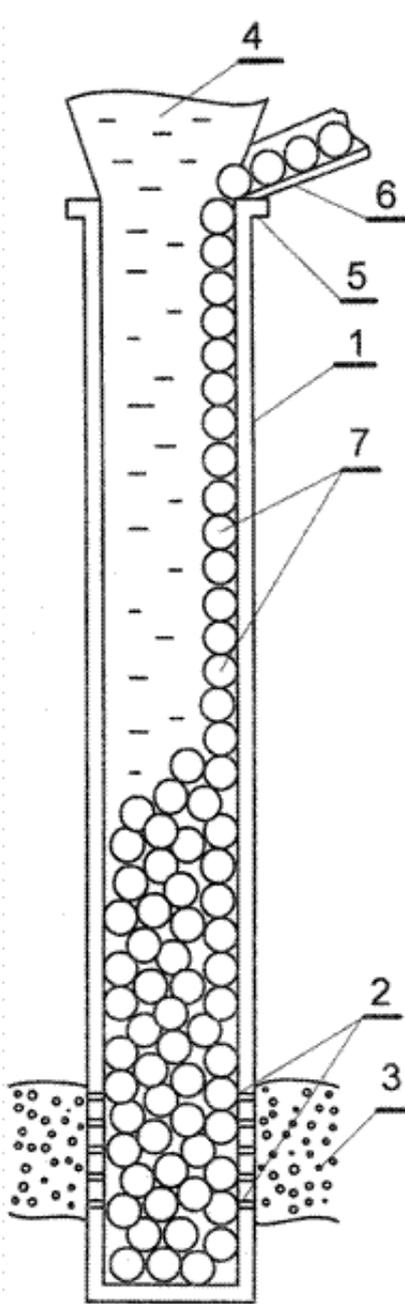
3. Способ по п.1, отличающийся тем, что диаметр шаров и миделевого сечения удлиненных тел вращения выбирают в пределах неравенства $D/3 - \Delta \leq d < D/3$,

где d - диаметр шаров и удлиненных тел вращения, м;

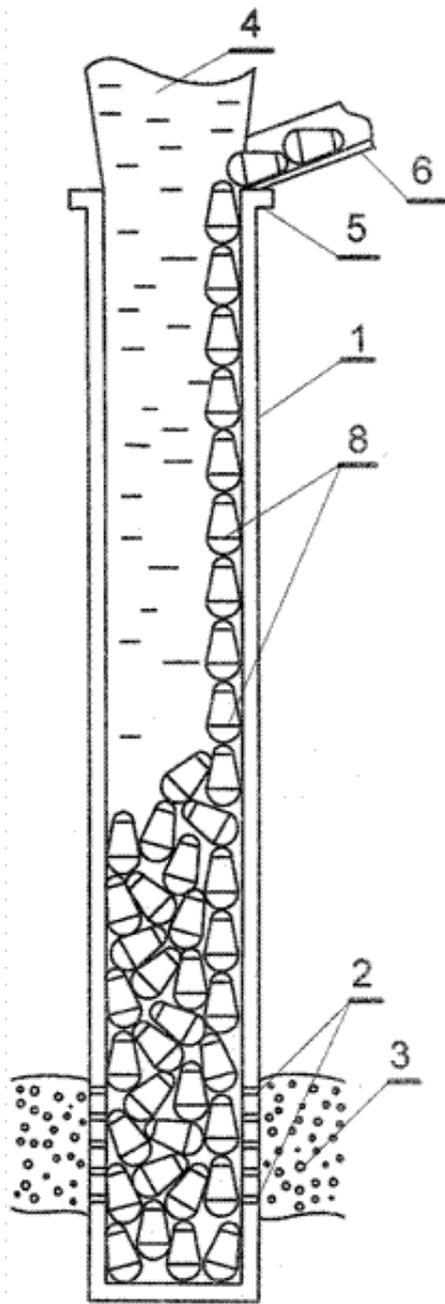
Δ - допуск на диаметр шаров и удлиненных тел вращения при изготовлении, м.

4. Способ по п.2 или 3, отличающийся тем, что для заполнения нижнего слоя заданного размера используют погружные элементы из свинца или олова, а их деформацию обеспечивают дальнейшим заполнением скважины погружными элементами из чугуна или стали.

5. Способ по п.1 или 4, отличающийся тем, что процесс ведут в два или более этапов, используя на первых этапах, более массивные погружные элементы, а после понижения дебита применяют менее массивные.



Фиг. 1



Фиг. 2