

4. Авт. свид. СССР. CO2 F 3/06. Биореактор для очистки и подкачки сточных вод / Яромский В.Н. [и др.]. – №1724601. Заявл. 28.11.89; Оpubл. 07.04.92 Бюл. №3 // Гос. Комитет по изобр. и открытиям при ГК НТ СССР.

УДК 628.112

В.В. Ивашечкин (БНТУ)

РЕГЕНЕРАЦИЯ СКВАЖИННЫХ ФИЛЬТРОВ С ПОМОЩЬЮ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ

Вводная часть

Представляет интерес способ регенерации фильтров водозаборных скважин, основанный на использовании энергии, выделяющейся при вводе мелкораспыленного жидкого азота в жидкость замкнутой камеры, сообщающейся с фильтром, либо при подводном выхлопе непосредственно в зону фильтра газообразного азота высокого давления, полученного в отдельной испарительной камере [1-4]. В обоих случаях выделяющаяся энергия преобразуется в энергию волн сжатия и разрежения, возникающих при пульсациях газового пузыря, и кинетическую энергию гидродинамического потока. Совместное действие этих факторов приводит к разрушению кольматирующих отложений и интенсифицирует их растворение при осуществлении способа в реагенте.

Наиболее близким по своей технической сущности предлагаемому способу является пневмореагентный способ регенерации, который представляет собой выхлоп сжатого воздуха в полость фильтра, заполненного реагентом [5]. Исследования, проведенные К.Н. Андреевым по изучению пневмореагентного способа, показали, что интенсивность растворения кольматирующих отложений при пневмоимпульсном воздействии в растворе реагента по сравнению с реагентной ванной возрастает в 8-15 раз. Пневмореагентный способ регенерации наиболее эффективен в скважинах, каптирующих рыхлые отложения со сроком эксплуатации 5-8 лет. Оборудо-

вание, применяемое для реализации пневморегентного способа, включает компрессор высокого давления, шланги, баллоны, пневмоснаряд и является достаточно сложным. Кроме этого сжатый воздух содержит 21% кислорода, который, попадая в прифилтрованную зону, окисляет двухвалентное железо и усиливает кольматационные процессы, укорачивая межремонтный период скважины. Кроме того кислород окисляет основной реагент - дитионит натрия и снижает его растворяющую способность [5].

Применение жидкого азота в качестве энергоносителя позволит упростить технологическое оборудование и исключить окисление железа и реагента.

Основная часть

Физические основы импульсно-криогенного способа регенерации Жидкий азот обладает высокой удельной энергоемкостью. Повышение давления в замкнутой или испарительной камерах происходит в результате резкого увеличения объема газа при испарении. Определим энергоемкость \mathcal{E} жидкого азота как работу A , которую может совершить 1 грамм - моль жидкого азота с молекулярным весом $M \cdot B \cdot N$ равным 28 г при переходе из жидкого состояния в газообразное при атмосферном давлении $p_{атм}$:

$$A = p_{атм} (V_г - V_{ж}) \quad (1)$$

где $V_г$ – объем 1 грамм-моля газообразного азота при нормальных условиях, $V_г = 0,0224\text{м}^3$; $V_{ж}$ – объем, который занимает 1 грамм-моля жидкого азота до расширения; $p_{атм} = 10^5$ Па.

Величину $V_{ж}$ найдем через плотность $\rho_{ж}$ жидкого азота по формуле

$$V_{ж} = \frac{M \cdot B \cdot N}{\rho_{ж}} \quad (2)$$

Окончательно получим

$$A = p_{атм} \left(V_г - \frac{M \cdot B \cdot N}{\rho_{ж}} \right) \quad (3)$$

При подстановке $M.B.N = 0,028\text{кг}$, $\rho_{ж} = 808 \text{ кг/м}^3$, $V_I = 0,0224\text{м}^3$, $p_{атм} = 10^5\text{Па}$ в выражение (3) получим, что энергоемкость 1грамма - моля жидкого азота составляет $\mathcal{E}_N = A=2,24 \text{ кДж}$. Отсюда следует, что энергоемкость \mathcal{E}_N одного килограмма жидкого азота составляет $\mathcal{E}_N = 80 \text{ кДж}$, что подтверждает его высокую удельную энергоемкость.

Давление p , возникающее при испарении сжиженного газа в замкнутом объеме, можно определить по формуле [6]

$$p = k \frac{V_{ж}}{V_K} (1 + \beta t), \quad (4)$$

где k - постоянная величина, зависящая от свойств используемого газа; $V_{ж}$ - объем жидкого газа; V_K - объем замкнутой камеры; β - коэффициент, зависящий от вида сжиженного газа ($\beta = 0,003674$ для азота); t - температура камеры.

В качестве сжиженного газа можно использовать сжиженный воздух, кислород, азот и другие газы. Наиболее удобен жидкий азот, так как введение кислорода и воздуха в зону фильтра скважины может вызвать окисление двухвалентного железа в прифилтровой зоне и интенсифицировать химические, а также, и биологические кольматационные процессы. Кроме того, азот, являясь попутным газом при получении кислорода из воздуха, имеет более низкую стоимость и широко применяется в криогенной технике. Легко транспортируется в сосудах Дьюара.

При испарении 1л жидкого азота плотностью $\rho_N = 808\text{кг/м}^3$ при 0°C образуется 650 дм^3 газа при Н.У. При подстановке в формулу (4) данных для жидкого азота, испаряющегося в температурных условиях скважины ($\beta = 0,003674$, $t = 10^\circ\text{C}$, $k = 650$), получим

$$p \approx 670 \frac{V_{ж}}{V_K}. \quad (5)$$

Анализ формулы (2) показывает, что при $V_{ж} = V_K$ давление в замкнутом объеме может возрасти в 670 раз к исходному давлению.

Работа с жидким азотом безопасна, испаряется он практически бесшумно. Скорость возрастания давления в камере, в которую вводится жидкий азот, определяется скоростью его ввода и интенсивностью теплообмена. Интенсивность теплообмена можно повысить, если вводить жидкий азот в воду. Чтобы вода при подаче в нее жидкого азота не замерзала, необходим расчет достаточных объемов воды и азота.

Расчет энергозатрат при декольматации фильтров импульсно-криогенным способом. Рассмотрим процессы, происходящие при накоплении газообразного азота в полости скважинного прибора и выхлопе в жидкость из выхлопных окон (рисунок 1).

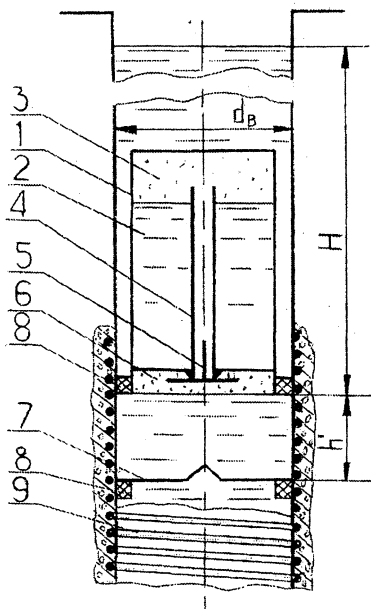


Рисунок 1. Расчетная схема для определения энергозатрат поинтервального импульсно-криогенного способа

1-корпус; 2- емкость с жидким азотом;

3- испарительная камера; 4-центральный патрубков; 5- импульсный клапан;

6- рабочая камера; 7-отражатель; 8-пакеры; 9- проволочная навивка

Пусть в скважину на глубину H поместили скважинное криогенно-импульсное устройство, состоящее из корпуса 1, емкости 2 с жидким азотом кольцевой формы, испарительной камеры 3, центрального патрубка 4 с импульсным клапаном 5 в нижней части, рабочей камеры 6 с отражателем 7 и пакерами 8. Находящийся в емкости 2 жидкий азот в результате подвода тепла извне испаряется и накапливается в испарительной камере 3. При достижении некоторого давления сжатого азота открывается импульсный клапан 5 и сжатый азот истекает через отверстие клапана 5 в рабочую камеру 6, которая сообщается с полостью фильтра.

Пусть в испарительной камере 3 скважинного снаряда перед открытием импульсного клапана находится сжатый газ с параметрами $V_{кам}$ и $p_{кам}$. Участок обрабатываемого фильтра закольматирован и ограничен снизу и сверху горизонтальными пакерами 8. Истекающий через клапан 5 сжатый газ заполняет рабочую камеру 6. Импульсный клапан 5 закрывается. В рабочей камере 6 после закрытия клапана 5 формируется газовая полость высокого давления с начальными параметрами $p_{нач}$ и $V_{нач}$. В жидкости распространяется волна давления, вызванная образованием полости. Газовая полость расширяется, в результате чего происходит деформация проволоочной навивки 9 каркасно-стержневого фильтра с образованием трещин в слое цементированной гравийной обсыпки.

Для расчета необходимых энергозатрат воспользуемся методикой, изложенной в работе [7].

После образования газовой полости, задачу распространения волны давления в полости закольматированного фильтра можно рассматривать как распространение гидравлического удара в тупиковом трубопроводе, когда к участку фильтра высотой h' внезапно подключили источник высокого давления (газовую полость). Давление на границе газовая полость – жидкость резко возрастает на величину

$$\Delta p_{уд} = p_{нач} - p_0. \quad (6)$$

Волна давления со скоростью c перемещается к стенке фильтра, имея давление на фронте равное $\Delta p_{уд}$. Скорость жидкости в плоскости фронта возрастает от 0 до v_0 , ее можно найти по формуле

$$v_0 = \frac{\Delta p_{уд}}{\rho c}. \quad (7)$$

При подходе фронта волны давления к закольматированному фильтру вся жидкость на участке длиной h' приобретает скорость v_0 , однако, ее дальнейшее движение невозможно из-за наличия паверов и скорость жидкости на фильтре в момент прихода волны будет уменьшаться до 0 .

При достижении прямой волной поверхности фильтра, давление в полости фильтра на участке обработки длиной h' будет равно $p_1 = p_0 + \Delta p_{уд}$, при этом жидкость будет сжиматься, а стенки закольматированного фильтра - расширяться.

Будем считать, что энергия газовой полости $W_{г.пол.}$ согласно [7] затрачивается на энергию гидротока $W_{г.п.}$, на работу по сжатию жидкости $W_{с.ж.}$ и работу по декольматации стенок фильтра $W_{д.с.}$:

$$W_{г.п.} + W_{с.ж.} + W_{д.с.} = W_{г.пол.} \quad (8)$$

Левая часть выражения (8) определяется по методике [7].

Реализованную энергию газовой полостью $W_{г.пол.}$ можно найти как сумму работ, произведенных волной сжатия $E_{в.с}$ и газовым пузырем $E_{п.}$, т.е.

$$W_{г.пол.} = E_{в.с} + E_{п.} \quad (9)$$

Величину $E_{в.с}$ найдем через акустический кпд η_a , который представляет собой долю запасенной потенциальной энергии $E_{нач}$

газовой полости в момент ее образования с начальным объемом $V_{нач.}$, уносимую волной сжатия :

$$E_{в.с.} = \eta_a \cdot E_{нач} = \eta_a \frac{p_{нач} V_{нач}}{k-1}. \quad (10)$$

Для определения акустического к.п.д. η_a расширяющейся подводной газовой полости воспользуемся результатами испытаний пневмоизлучателей сейсмического сигнала при морской сейсморазведке [8]. Определенные расчетным путем значения η_a для расширяющейся газовой сферы при различных значениях $p_{нач}/p_0$ и k , где p_0 - начальное давление в месте выхлопа, приведены в таблице 1 [8].

Таблица 1 – Расчетные значения акустического КПД для расширяющейся газовой сферы под водой [8]

p_n/p_0	Начальное давление газов внутри полости, 10^5 Па									
	10		30		60		100		150	
	Показатель адиабаты газов k									
	1,25	1,4	1,25	1,4	1,25	1,4	1,25	1,4	1,25	1,4
Акустический КПД η_a , %										
10	0,9	1,26	1,58	2,22	2,0	3,09	2,87	3,94	3,5	4,83
30	-	-	2,13	2,74	3,02	3,88	4,01	5,25	5,0	6,32
60	-	-	-	-	3,58	4,32	4,6	5,55	5,65	6,78
100	-	-	-	-	-	-	5,01	5,85	6,2	7,18
150	-	-	-	-	-	-	-	-	6,5	7,32

Величину E_n найдем согласно [7] по формуле

$$E_{\text{п}} = \eta_{\text{г}} E_{\text{нач}} K_{\text{э}} \left[1 - \left(\frac{V_{1.\text{п}}}{V_{2.\text{п}}} \right)^{k-1} \right], \quad (11)$$

Гидравлический к.п.д. $\eta_{\text{г}}$ (отношение потенциальной энергии $E_{\text{пот}}$ газовой полости, равной работе против сил внешнего давления p_0 , к начальной энергии газовой полости $E_{\text{нач}}$) найдем, воспользовавшись результатами скоростной съемки подводного выхлопа сжатого воздуха из пневмокамеры, представленными на рисунке 2 [8].

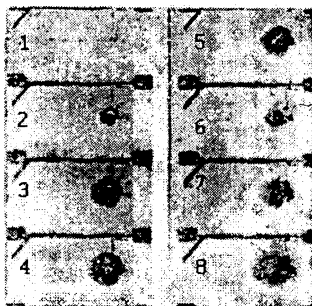


Рисунок 2 – Фотограммы подводного выхлопа сжатого воздуха из камеры объемом $V_{\text{кам}}=1\text{дм}^3$ при давлении в камере $p_{\text{кам}}=100 \cdot 10^5 \text{Па}$, интервал времени между кадрами равен 0,015с

По снимкам (рисунок 2) газовая полость как в момент ее образования (кадр 2), так и при достижении максимальных размеров (кадр 4) имеет форму, близкую к сфере. По замерам отношение максимального давления в газовой полости $p_{\text{нач}}$ к начальному давлению в рабочей камере $p_{\text{кам}}$ не превышает 0,4, т.е. $p_{\text{нач}}/p_{\text{кам}}=0,4$ [8]. Тогда при давлении окружающей среды в месте выхлопа $p_0 \approx 10^5 \text{Па}$ и $p_{\text{кам}}=100 \cdot 10^5 \text{Па}$ получим

$$p_{\text{нач}} \approx 40 p_0 \approx 40 \cdot 10^5 \text{ Па}. \quad (12)$$

Из фотограммы (рисунок 2) следует, что соотношение максимального радиуса газовой полости R_{max} (кадр 4) к начальному радиусу газовой полости $R_{нач}$ (кадр 2), т.е. $R_{max} / R_{нач} \approx 2,1$, отсюда

$$R_{max} \approx 2,1 R_{нач}. \quad (13)$$

Потенциальную энергию $E_{пот}$ газовой полости, равную работе против сил внешнего давления p_0 , найдем из выражения

$$E_{пот} = p_0 (V_{max} - V_{нач}). \quad (14)$$

Начальная энергия $E_{нач}$ газовой полости перед расширением равна

$$E_{нач} = \frac{p_{нач} V_{нач}}{k - 1}. \quad (15)$$

Гидравлический к.п.д. $\eta_r = E_{пот} / E_{нач}$ с учетом (14-15) равен

$$\eta_r = \frac{p_0 (V_{max} - V_{нач})(k - 1)}{p_{нач} V_{нач}}. \quad (16)$$

При подстановке (12-13) в выражение (16) и при $k=1,4$ получим

$$\eta_r = \frac{p_0 \frac{4}{3} [(2,1 R_{нач})^3 - R_{нач}^3] (1,4 - 1)}{\frac{4}{3} R_{нач}^3 \cdot 40 p_0} \approx 0,085. \quad (17)$$

Подставив выражения (9)-(11) в уравнение (8) и выразив начальный объем $V_{нач}$ газовой полости получим

$$V_{нач} \approx \frac{\pi r_0^2 h' \Delta p_{уд}^2 \left[\frac{1}{2\rho c^2} + \frac{1}{2E_{ж}} + \frac{r_n S \psi_{пр}}{f_{пр} E_{пр}} \right] (k-1)}{P_{нач} \left\{ \eta_a + \eta_r K_3 \left[1 - \left(\frac{V_{1.п}}{V_{2.п}} \right)^{k-1} \right] \right\}} \quad (18)$$

Выражение (18) позволяет определить объем сжатого азота, необходимый для создания трещин в закольматированной зоне скважинного фильтра высотой h' и толщиной δ .

Рассмотрим пример.

ПРИМЕР.

Определить необходимое количество жидкого азота для создания сквозных трещин в закольматированной обсыпке при импульсной декольматации 1 м.п. каркасно-стержневых фильтров с проволочной навивкой, технические характеристики которых представлены в таблице 23 [9]. Если $\delta = 0,06$ м, кубиковая прочность сцементированного гравия $\bar{R}_{с.г.} = 2$ МПа, сопротивление растяжению $R_{с.г.} = 0,37$ МПа, $E_{с.г.} = 15000$ МПа. Проволочная навивка – сталь марки 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-72) с модулем упругости $E_{пр} = 240000$ МПа. Просвет проволочной навивки $t = 2,5$ мм. Глубина обработки $H = 70$ м, которой соответствует давление $p_0 = 0,8$ МПа.

Решение:

1. Параметры фильтров наиболее применяемых диаметров: 5, 6, 8, 10, 12 дюймов возьмем из таблицы 23 [9].
2. По графику (рисунок 3.3, [10]) принимаем значения второго предельного давления p_{II} для образования в закольматированной зоне сквозных трещин. Для фильтров 5, 6, 8 дюймов принимаем $p_{II} = \Delta p_{уд} = 7,7$ МПа, а для фильтров диаметром 10 и 12 дюймов- $p_{II} =$

$\Delta p_{уд} = 9,2 \text{ МПа}$. Тогда согласно (6) необходимые начальные давления $p_{нач}$ в газовой полости составят: $p_{нач} = \Delta p_{уд} + p_0$.

Для фильтров 5, 6, 8 дюймов $p_{нач} = 7,7 + 0,8 = 8,5 \text{ МПа}$. Для фильтров 10 и 12 дюймов $p_{нач} = 9,2 + 0,8 = 10 \text{ МПа}$.

2. Акустический КПД определим по таблице 1 для принятого диапазона соотношений $p_{нач}/p_0 = 10,6 - 12,5$ и $k = 1,4$. Акустический КПД равен $\eta_a \approx 4\%$. Гидравлический КПД примем согласно расчетов по формуле (16) равным $\eta_r = 0,085$, κ_s – коэффициент использования энергии примем таким же, как и для парового пузыря, образующегося при электрогидравлическом разряде, $\kappa_s = 0,15$ [11]. Соотношение $V_{1,п}/V_{2,п}$ примем приближенно 0,8.

Расчеты $V_{нач}$ произведем по формуле (17). Необходимое количество жидкого азота для обработки 1 м.п. фильтра определяем исходя из того, что при испарении 1 л жидкого азота плотностью $\rho_N = 808 \text{ кг/м}^3$, образуется 650 л газа при Н.У. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2- Результаты расчетов запасаемой энергии в камере для декольматации 1 м.п. фильтров

Типо- размер фильтра	$f_{пр}, \text{ м}^2$	$S,$ м	$r_{вз}, \text{ м}$	$h',$ м	$c,$ м/с	$p_{нач},$ МПа	$V_{нач},$ дм ³	$E_{нач},$ кДж	$V_{жс}$ на 1 м.п., дм ³
1	2	3	4	5	6	7	8	10	11
СП-5Ф	$3,14 \cdot 10^{-6}$	0,0045	0,087	0,18	1239	8,5	0,1	2,1	0,1
СП-6Ф	$3,14 \cdot 10^{-6}$	0,0045	0,098	0,2	1219	8,5	0,5	10,6	0,4
СП-8Ф	$3,14 \cdot 10^{-6}$	0,0045	0,124	0,25	1178	8,5	1,1	23,4	0,6
СП-10Ф	$7,07 \cdot 10^{-6}$	0,0055	0,151	0,3	1168	10,0	1,9	47,5	1,0
СП-12Ф	$7,07 \cdot 10^{-6}$	0,0055	0,177	0,35	1131	10,0	3,4	85	1,5

Выводы

1. Рассмотрены физические основы применения жидкого азота для регенерации фильтров скважин.
2. Определены удельные энергозатраты декольматации фильтров скважин с помощью жидкого азота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ регенерации фильтров водозаборных скважин: а.с. 1301945 СССР, МКИ А1 Е03В3/15, Е21В 37/00 В.В. Ивашечкин, А.Н. Кондратович, Б.В. Сабадах, Н.П. Матвейко; Белорус. политехн. ин-т.-№ 3974476/29-33; заявл. 10.11.85; опубл. 07.04.87// Открытия. Изобрет.-1987. – № 13.
2. Способ регенерации фильтров водозаборных скважин: а.с. 1578284 СССР, МКИ А1 Е03В3/15 / В.В. Ивашечкин, В.С. Алексеев, Д.А. Козлов, В.Т. Гребенников, В.Т. Малишевский; Белорус. политехн. ин-т.-№ 4417946/23-33; заявл. 28.04.88; опубл.15.07.90// Открытия. Изобрет., 1990. – № 26.
3. Импульсно-криогенный способ восстановления пропускной способности фильтров скважин: Отчет о НИР (заключ.) / Белорус. политех. ин.-т; рук. темы Д.А. Козлов. – Минск, 1989. – 67с.
4. Устройство для импульсно-реагентной очистки скважинного фильтра: а.с. 1641982 СССР, МКИ А1 Е21В37/02 / Д.А. Козлов, В.В. Ивашечкин, В.С. Алексеев, М.Ю. Стриганова, И.А. Герасименко; Белорус. политехн. ин-т.-№ 4436160/03; заявл. 03.06.88; опубл.15.04.91// Открытия. Изобрет, 1991. – № 14.
5. Андреев, К.Н. Пневмореагентная регенерация скважин на воду: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.04 / К.Н. Андреев. – Москва, 1990. – 23 с.
6. Степанов, В.Г. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов/ В.Г. Степанов, И.А. Шавров// Л.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
7. Ивашечкин, В.В. Расчет энергозатрат при газоимпульсной регенерации фильтров водозаборных скважин//Энергетика– Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ, 2004, № 1. – С. 77-86.