



НЕОДИМОВЫЙ МАГНИТНЫЙ СЕПАРАТОР НМС-1 ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИЗ ПЛАСТОВОЙ ВОДЫ ЭМУЛЬГИРОВАННЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОДИСПЕРСНОГО МАГНЕТИТА

И.Ю.Быков¹, Н.Д.Цхадая¹, Ю.Г.Смирнов¹, А.А.Лютюев*¹, В.И.Семи²

¹Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия;

²ООО «Научно-производственное объединение «Буровая техника»», Москва, Россия

Neodymium Magnetic Separator NMS-1 for Extraction of Emulsified Oil Products from Reservoir Water with the Use of Nanodispersed Magnetite

I.Yu.Bykov¹, N.D.Tskhadaya¹, Yu.G.Smironov¹, A.A.Lutoev¹, V.I.Semin²

¹Ukhta State Technical University, Ukhta, Russia;

²JSC «Scientific and Production Association «Drilling Equipment»», Moscow, Russia

Abstract

The design of the magnetic separator meant to extract the emulsified oil droplets from reservoir water with the use of nanodispersed particles of magnetite and non-uniform magnetic field is proposed. The method for estimating the performance of the magnetic separator in the structure under consideration and the selection of optimal parameters is described in detail.

Keywords:

Magnetic separator;
Neodymium magnet;
Highly dispersed magnetite;
Emulsified oil;
Ferromagnetic cartridge.

© 2018 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

Введение

При добыче нефти попутно добываемые пластовые воды закачивают обратно в пласт для поддержания давления. Присутствие в закачиваемой воде эмульсионных капель нефти и механических примесей приводит к снижению проницаемости продуктивных и поглощающих пластов [1]. Кроме того, добытую пластовую воду, с находящимися в эмульгированном состоянии нефтяными частицами, нецелесообразно закачивать обратно в пласт, а сброс на ландшафт не допускается из-за несоответствия требованиям, предъявляемым к таким водам.

В работах [1,2] рассматривается возможность доочистки пластовой воды от эмульгированных нефтепродуктов с применением высокодисперсных магнитных частиц магнетита и неоднородного магнитного поля. Известен зарубежный опыт [3, 4] по разрушению водонефтяной эмульсии с помощью высокодисперсных ферромагнитных частиц. В работе [3] было установлено, что среди параметров, влияющим на сорбционную способность, значимым является размер частиц сорбтива. В этой же работе также было показано, что твердые частицы размерами меньше микрона способны стабилизировать эмульсии различного

типа (вода в нефти или нефть в воде). В работе [4] магнитные частицы использовались для обезвоживания нефти. Идея заключается в том, что наночастицы магнетита «стараятся» занять место в пограничном слое нефти и воды. Путем агрегации на поверхности эмульсионной капли, частицы придают ей магнитный момент в магнитном поле. В настоящей работе предлагается высокоградиентный магнитный сепаратор для извлечения из пластовой воды капли нефти обладающей слабым магнитным моментом.

Неодимовый магнитный сепаратор

В работе [1] на основе математического и компьютерного моделирования, оценены конструктивные особенности устройства для извлечения омагниченных эмульсионных капель, обладающих слабым магнитным моментом.

Таким образом, на основании названных исследований в статьях [1-4] предлагается конструктивно новая модель неодимового магнитного сепаратора НМС-1 (рис. 1), предназначенного для очистки пластовой воды от эмульгированных нефтепродуктов. На болтах соединены основной корпус 9 и нижняя часть съемного корпуса 8, между которыми находится герметичный уплотнитель. На нижней части корпуса находятся патрубок входа очищаемой жидкости 4 и патрубок входа 2 при промывке горячей водой

*E-mail: allyutoev@yandex.ru

<http://dx.doi.org/10.5510/OGP20180400366>



Рис.1. Магнитный сепаратор НМС-1

1 – штекер подключения ТЭН, 2 – патрубок входа для промывки и добавления ПАВ, 3 – ТЭН, 4 – патрубок входа очищаемой жидкости, 5 – направляющая картриджа, 6 – ферромагнитный картридж, 7 – герметичный уплотнитель, 8 – нижняя часть разъемного корпуса, 9 – основной корпус, 10 – патрубок выхода во время промывки, 11 – патрубок выхода во время очистки, 12 – верхняя часть разъемного корпуса, 13 – неодимовый магнит, 14 – клапан патрубков очистки, 15 – клапан патрубков промывки

совместно с ПАВ. В процессе первичной промывки прекращается режим очистки путем одновременного закрытия клапанов 15 на патрубке входа 4 и выхода 10. Одновременно с этим открываются клапана 14 на патрубках 2 и 11. Через патрубок 2 поступает под напором горячая вода с добавлением ПАВ. Неодимовый магнитный сердечник 13 извлекается из верхней крышки корпуса (кассеты) 12, перемещая за собой омагниченную массу к верхнему патрубку и способствуя процессу промывки. После первичной промывки включается тепловой электронагреватель ТЭН 8 и доводится до кипения жидкость внутри сепаратора, что способствует частичному размагничиванию картриджа, за счет флуктуации магнитных моментов внутри доменов, и удалению нефтяных отложений. Ферромагнитный картридж 6 устанавливается на направляющую 5. Устанавливается путем откручивания шести болтов и снятия крышки 12. Поток очищаемой жидкости течет вдоль ферромагнитных стержней.

Размеры ферромагнитного картриджа, точнее диаметр, определяются из соотношения

$D = 3a$, где a – сторона квадрата в поперечном сечении сердечника NdFeB, D – диаметр рабочей зоны магнитного сепаратора в поперечном сечении. При соблюдении этого условия индукция магнитного поля наблюдается выше 0.12 Тл. Суперпарамагнитные наночастицы магнетита становятся магнитно насыщенными в таком поле.

Предложенная конструкция отличается тем, что за счет картриджа существенно сокращается расстояние извлечения, равное $d/2$, где d – расстояние между стержнями (рис. 3) а, следовательно и время очистки. Цель настоящей работы состоит в том, чтобы определить конструктивные особенности магнитного сепаратора и оценить его производительность. Для этого определяется скорость потока очищаемой жидкости через картридж неодимового магнитного сепаратора, при которой омагниченная эмульсионная капля будет захвачена.

Методика расчета производительности магнитного сепаратора

Среди различных способов расположения стержней в картридже был обоснован в работе [1] тип ромб (рис. 2). Вектор напряженности внешнего магнитного поля направлен вдоль траектории А. При намагничивании стержней во внешнем магнитном поле, его векторы самоиндукции противоположно направлены внешнему полю. Это приводит к уменьшению поля в боковых областях стержней. При таком расположении нижний и верхний стержни компенсируют поле боковых стержней.

Рассмотрим модель извлечения омагниченной эмульсионной капли между стержнями в ферромагнитном картридже, которая изображена на рисунке 3а. Эмульсионная капля нефти движется в потоке между ферромагнитными стержнями толщиной t и длиной L . Расстояние между стержнями d . Скорость потока жидкости $V_{пот}$ в магнитном сепараторе устанавливается из расчета скорости движения омагниченной нефтяной капли в магнитном поле $V_{эм}$. На рисунке 3б изображено расположение стержней картриджа в поперечном сечении.

Ранее [5] была получена формула скорости движения капли нефти, покрытой монослоем нанодисперсных магнитных частиц, в неоднородном магнитном поле. Имеется эмульсионная капля нефти в воде диаметром $d_{эм}$. Капельки эмульсии считаем сферическими. Также положим, что в эмульсии содержатся в небольшой концентрации магнитные частицы с диаметрами $d_{ч}$, которые образуют монослой на поверхности капелек эмульсии. Скорость движения намагниченной капли нефти в неоднородном магнитном поле может быть оценена по следующей формуле:

$$v(x) = \frac{2kd_{эм}d_{ч}M_{нас}L(z_{ч})}{9\eta} \left| \frac{dB}{dx} \right|, \quad (\text{м/с}) \quad (1)$$

где $\eta = 0.89 \cdot 10^{-3}$ Па·с – динамическая вязкость воды, намагниченность магнетита при насыще-

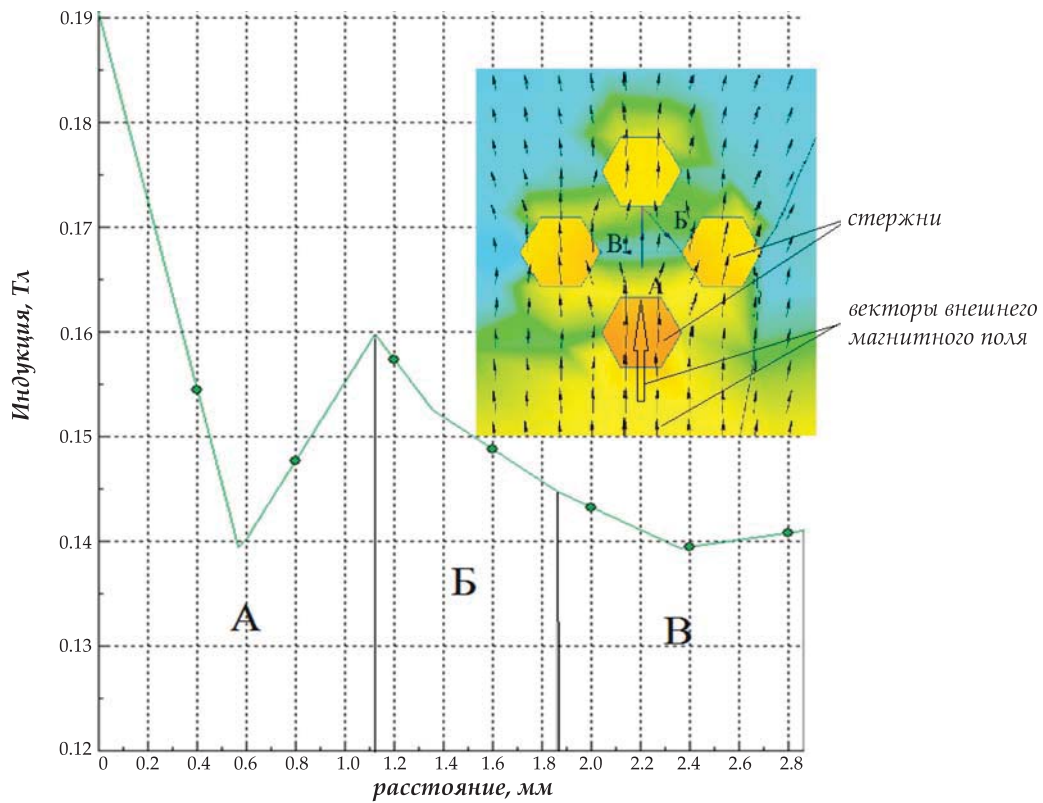


Рис.2. Расчет магнитного поля стержней диаметром 1 мм расположения типа ромб в поле 0.12 Тл (расстояние между стержнями 1 мм) по траекториям: А – между верхним и нижним, Б – верхним и правым, В – левым и правым

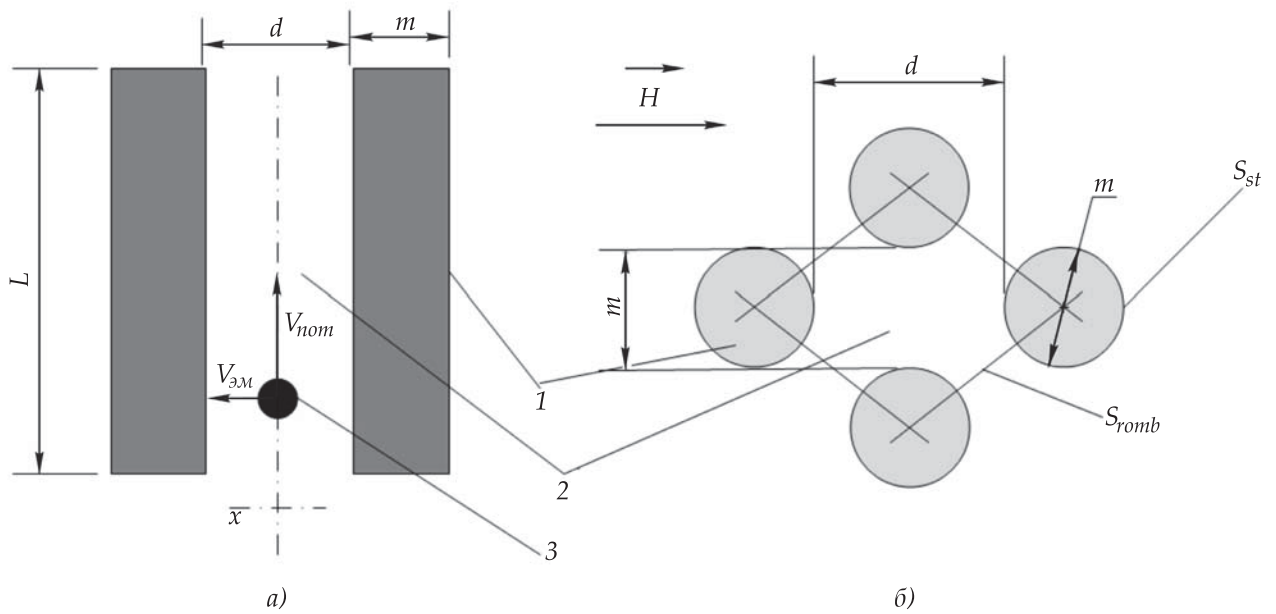


Рис.3. Модель извлечения омагниченной нефтяной капли в НМС-1: а) Модель движения капли в магнитном поле, б) поперечное сечение рабочей зоны магнитного сепаратора, 1 – ферромагнитные стержни, 2 – рабочая зона между стержнями, 3 – омагниченная эмульсия нефти

нии $M_{нас} = 4.78 \cdot 10^5$ А/м, dB/dx – градиент магнитного поля (Тл/м), $L(z)$ – функция Ланжевена (намагничивание суперпарамагнетиков), k – коэффициент упаковки наночастиц магнетита на поверхности капли нефти.

По формуле 1 контролируемыми параметрами для магнитного сепаратора являются градиент и напряженность магнитного поля. Магнитное насыщение для нанокодисперсного магнетита происходит при напряженности магнитного поля 100 кА/м, поэтому большее значение напряженности магнитного поля не влияет на скорость движения частиц. В то же время градиент магнитного поля является управляемым параметром, с помощью которого можно изменять скорость, а, соответственно, и производительность магнитного сепаратора.

Время осаждения намагниченных эмульсионных капель на поверхности стальных стержней может быть оценена по следующей формуле:

$$T = \int_0^d \frac{dx}{2v(x)} \quad (2)$$

Зная время T и длину магнитного стержня L , можно определить оптимальную скорость потока очищаемой жидкости в зависимости от размеров эмульсионных капель:

$$v_{opt} \leq (L/T) \quad (м/с). \quad (3)$$

Производительность магнитного сепаратора определяется с учетом его рабочей площади S_r (рис. 3). Объем очищаемой воды в единицу времени:

$$Q = v_{opt} S_r \quad (м^3/с). \quad (4)$$

Рабочая площадь сечения магнитного сепаратора диаметром D с учетом квадратного сердечника стороной a и ферромагнитного картриджа (рис. 4):

$$S_r = \varphi \left(\frac{\pi D^2}{4} - a^2 \right) \quad (м^2), \quad (5)$$

где φ – коэффициент рабочей зоны магнит-

ного картриджа.

Для его определения обратимся к рисунку 3б. Выделим ромбовидную область между стержнями толщиной m . На рисунке между левым и правым стержнем определим расстояние через величину d , а между верхним и нижним стержнем расстояние m . На предложенной модели каждый следующий стержень будет удален от магнитного сердечника на расстояние d . Коэффициент рабочей зоны отсюда:

$$\varphi = \frac{S_{romb} - S_{st}}{S_{romb}} = \frac{\frac{(m+d) \cdot 2 \cdot m}{2} - \frac{\pi m^2}{4}}{\frac{(m+d) \cdot 2 \cdot m}{2}} = \frac{(m+d) - \pi m / 4}{(m+d)}, \quad (6)$$

где S_{romb} – площадь выделенной области, S_{st} – площадь сечения стержня (рис. 3).

С учетом вышеприведенных формул (1)-(6) и рассматриваемой модели, производительность магнитного сепаратора будет определяться следующей формулой:

$$Q = \frac{4 S_r L k d_{эм} d_u M_{нас} L(z_u)}{9 \eta d} \left| \frac{dB}{dx} \right| \quad (м^3/с) \quad (7)$$

В работе [1] было показано, что радиус действия магнитов NdFeB (индукция магнитного поля выше 0.12 Тл) можно считать равным размеру соответствующего магнита. Для магнитного сердечника NdFeB с квадратным основанием со стороной 100 мм (рис. 1), индукция магнитного поля 0.12 Тл наблюдается на расстоянии также около $R = 100$ мм. Такого магнитного поля достаточно, чтобы наночастицы магнетита (10 нм) были магнитно насыщенными.

Методика получения таких частиц была описана в работе Массарта [6]. Частицы осаждались при дополнительном использовании раствора гидроксида аммония. Суть методики получения таких частиц – действие оснований на раствор смеси солей двух- и трехвалентного железа. Так, к раствору, содержащему $FeSO_4$ и $FeCl_3$ в молярном соотношении 1:2 добавлялся водный раствор аммиака. Образующиеся наночастицы Fe_3O_4 имеют достаточно узкое распределение по размерам, причем размер частиц в коллоидном растворе не превышает 5–9 нм. В качестве основной химической реакции для получения наночастиц была использована реакция: $2FeCl_3 + FeSO_4 + 8NH_4OH \rightarrow Fe_3O_4 \downarrow + 6NH_4Cl + (NH_4)_2SO_4 + 8H_2O$

Изменение условий (температуры и pH раствора) позволяет существенно изменять как фазовый состав, так и размер образующихся наночастиц. К примеру, увеличение значения pH приводит к росту размера кристаллов и возникновению частиц α -оксида железа шарообразной формы. Стабилизация размера частиц магнетита достигается добавлением специального ПАВА.

Для оценки эффективности размещения стержней в картридже и соотношения их диаметров относительно расстояния между стержнями

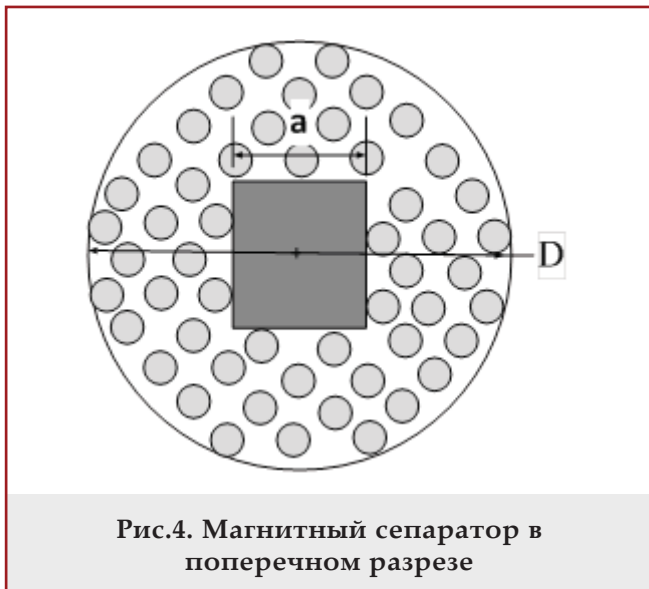


Рис.4. Магнитный сепаратор в поперечном разрезе

выполнено сравнением расчетных значений производительности сепаратора при разных комбинациях этих показателей. Результаты расчетов представлены в таблице 1 со следующими размерами: длина ферромагнитного стержня в картридже $L = 0.5$ м, диаметр магнитного сепаратора в поперечном сечении $D = 0.3$ м, неодимовый магнит со стороной $a = 0.1$ м. Размеры частиц магнетита $d_{ch} = 10^{-8}$ м, размер капель эмульсии $d_{эм} = 10^{-6}$ м.

Анализ полученных результатов показал, что увеличение толщины стержней, при фиксированном расстоянии d между ними, влечет уменьшение полезной площади рабочей зоны картриджа. При этом производительность увеличивается за счет более высокого градиента магнитного поля. В то же время сокращается рабочий объем картриджа, что ведет к более частым промывкам. Таким образом управлять производительностью магнитного сепаратора можно при помощи толщины стального стержня. Рекомендуется использовать стержни 1 - 4 мм. Рабочий объем V уменьшается при этом от 0.47V до 0.37V.

Повысить производительность магнитного сепаратора возможно посредством увеличения габаритов устройства. Расчеты показали, что при увеличении диаметра магнитного сепаратора в поперечном сечении до $D = 0.9$ м и размера неодимового магнита до $a = 0.3$ м (для стержней толщиной 1 мм, находящихся на расстоянии 1 мм) производительность увеличивается с 8.31 м³/час

до 74.8 м³/час. В таблице 2 представлен расчет производительности при следующих параметрах: $L = 0.5$ м, $D = 0.9$ м, $d_{ch} = 10^{-8}$ м, $d_{эм} = 10^{-6}$ м.

Имея данные о пластовой воде и размерах сорбента, можно подобрать оптимальные параметры магнитного сепаратора НМС-1 путем расчетов по алгоритму, приведенному на следующей блок-схеме (рис. 5). Например, после изучения распределение размеров глобул нефти в пластовой воде и частиц ферромагнитного сорбента, можно рассчитать производительность магнитного сепаратора заданных габаритов.

Выводы

Таким образом, в статье рассмотрена конструкция и предложена методика оценки производительности неодимового магнитного сепаратора НМС-1. Расчеты показали, что устройство НМС-1 продемонстрировало реальную возможность извлечения эмульгированных нефтяных глобул размерами 1 мкм, покрытых монослоем магнитных частиц размерами до 10 нм. Разработана методика, позволяющая расчетным путем выбирать оптимальные параметры магнитного сепаратора для конкретных условий применения. Для эффективной работы НМС-1 картридж рекомендуется изготавливать из стержней толщиной 1 - 4 мм и располагать на расстоянии 1 мм друг от друга. При увеличении расстояния резко снижается производительность.

Расчет производительности магнитного сепаратора $D = 0.3$ м

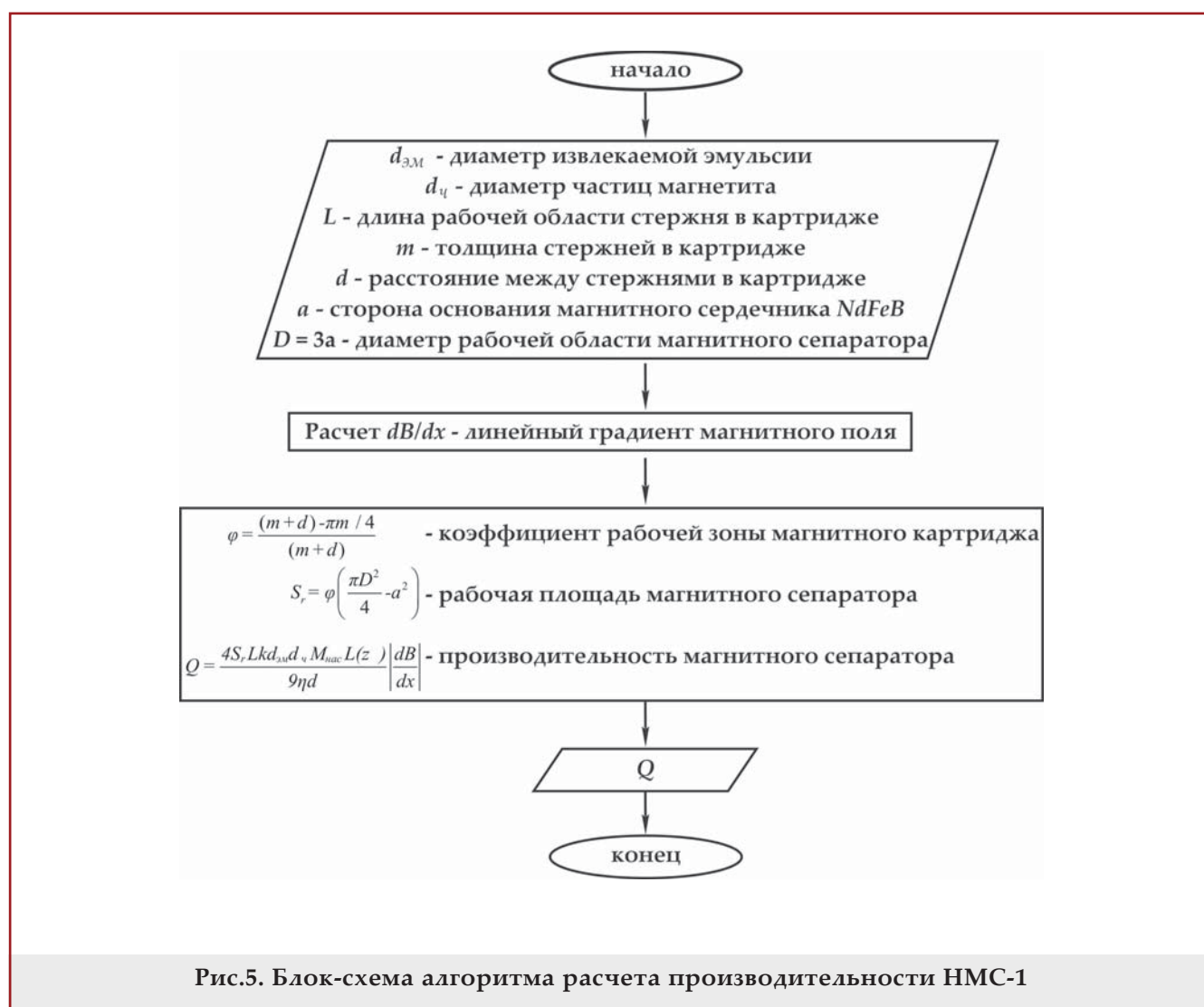
Таблица 1

Толщина стержня 10^{-3} , м	Расстояние между стержнями 10^{-3} , м	Усредненный градиент магнитного поля, Тл/м	Скорость потока в магнитном сепараторе, м/с	Производительность сепаратора, м ³ /ч
1	1	105	0.063	8.31
2	1	140	0.083	8.69
	2	80	0.024	3.17
	3	59	0.011	1.76
	4	39.5	0.005	0.95
3	1	180	0.107	9.64
	2	95	0.028	3.27
	3	63	0.012	1.66
	4	41	0.006	0.88
4	1	216	0.128	10.46
	2	132	0.039	4.1
	3	59.6	0.011	1.42
	4	48.5	0.007	0.96
	6	25.3	0.002	0.38
6	1	286	0.17	12.18
	2	181	0.054	4.85
	3	68.5	0.013	1.42
	4	56	0.008	0.96
	6	41	0.004	0.54

Таблица 2

Расчет производительности магнитного сепаратора $D = 0.9$ м

Толщина стержня 10^{-3} , м	Расстояние между стержнями 10^{-3} , м	Усредненный градиент магнитного поля, Тл/м	Скорость потока в магнитном сепараторе, м/с	Производительность сепаратора, м ³ /ч
1	1	105	0.063	74.8
2	1	140	0.083	78.2
	2	80	0.024	28.5
	3	59	0.011	15.8
	4	39.5	0.005	8.44
3	1	180	0.107	86.8
	2	95	0.028	29.5
	3	69	0.012	16.4
	4	47	0.006	9.1
4	1	216	0.128	94.2
	2	132	0.039	36.9
	3	78	0.011	16.8
	4	53	0.007	9.44
	6	25.3	0.002	3.35



Литература

1. Н.Д.Цхадая, И.Ю.Быков, И.Ф.Чупров и др. Обоснование параметров конструкции неодимового магнитного сепаратора для очистки пластовых вод // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 8. – С. 112–115.
2. А.А.Лютюев, Ю.Г.Смирнов, И.В. Ивенина. Извлечение эмульгированных примесей нефти из воды при помощи высокодисперсных частиц магнетита // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2014. – №4. – С. 40-45.
3. A.P.Sullivan, P.K.Kilpatrick. The effect of inorganic solid particles on water and crude oil emulsion stability // Industrial and Engineering Chemistry Research. – 2002. – Vol.41. – P.3389-3404.
4. R.R.Oder. Emulsions breaking with magnetic fields // Paper presented at the 18th annual conference of American filtration society. – Atlanta, April 10-13 2005. – 25 p.
5. А.А.Лютюев, Ю.Г.Смирнов. Численное моделирование процесса омагничивания нефтяных эмульсий с использованием наночастиц магнетита для управления системой очистки воды от нефтепродуктов // Естественные и технические науки. – 2013. – № 2. – С. 334–342.
6. R.Massart. Preparation of aqueous magnetic liquids in alkaline and acidic media // IEEE Transactions on Magnetics. – 1981. – Vol.MAG-17. – No. 2. – P. 1247–1248.

References

1. N.D.Tskhadaya, I.Yu.Bykov, I.F.Chuprov, et al. Substantiating parameters of the neodymium magnetic separator construction for afterpurification of emulsified reservoir water // Oil industry. – 2017. – No. 8. – P. 112–115.
2. A.A.Lyutoev, Yu.G.Smirnov, I.V.Ivenina. Extraction of oil emulsified impurities from water by means of high-disperse particles of magnetite // Environment protection in oil and gas complex. – 2014. – No. 4. – P. 40-45.
3. A.P.Sullivan, P.K.Kilpatrick. The effect of inorganic solid particles on water and crude oil emulsion stability // Industrial and Engineering Chemistry Research. – 2002. – Vol.41. – P.3389-3404.
4. R.R.Oder. Emulsions breaking with magnetic fields // Paper presented at the 18th annual conference of American filtration society. – Atlanta, April 10-13 2005. – 25 p.
5. A.A.Lyutoev, Yu.G.Smirnov. Numerical simulation of the magnetization of oil emulsions using nanoparticles magnetite for management the system of water treatment from oil products // Natural and technical sciences. - 2013. – No. 2. – P. 334–342.
6. R.Massart. Preparation of aqueous magnetic liquids in alkaline and acidic media // IEEE Transactions on Magnetics. – 1981. – Vol.MAG-17. – No. 2. – P. 1247–1248.

Неодимовый магнитный сепаратор НМС-1 для извлечения из пластовой воды эмульгированных нефтепродуктов с применением нанодисперсного магнетита

И.Ю.Быков¹, Н.Д.Цхадая¹, Ю.Г.Смирнов¹, А.А.Лютюев¹, В.И.Семин²

¹Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия;

²ООО «Научно-производственное объединение «Буровая техника», Москва, Россия

Реферат

Предложена конструкция магнитного сепаратора, предназначенного для извлечения эмульгированных капель нефти из пластовой воды, с применением нанодисперсных частиц магнетита и неоднородного магнитного поля. Детально описана методика оценки производительности магнитного сепаратора в рассматриваемой конструкции и выбора оптимальных параметров.

Ключевые слова: магнитный сепаратор; неодимовый магнит; высокодисперсный магнетит; эмульгированная нефть; ферромагнитный картридж.

Nanodispers maqnetitin tətbiqi ilə lay suyundan emulsiyalaşmış neft məhsullarının çıxarılması üçün nəzərdə tutulmuş NMS-1 neodim maqnit separatoru

İ.Yu.Bykov¹, N.D.Sxadaya¹, Y.G.Smirnov¹, A.A.Lyutoev¹, V.İ.Semin²

¹Uxta Dövlət Texniki Universiteti, Uxta, Rusiya;

²«Qazma texnikası» Elmi-İstehsalat Birliyi» MMC, Moskva, Rusiya

Xülasə

Məqalədə maqnetit və qeyri-bircins maqnit sahənin nanodispers hissəciklərinin tətbiqi ilə lay suyundan emulsiyalaşmış neft damcılarının çıxarılması üçün nəzərdə tutulmuş maqnit separatorun konstruksiyası təklif edilmişdir. Maqnit separatorunun baxılan konstruksiyada məhsuldarlığının qiymətləndirilməsi və optimal parametrlərin seçilməsi metodikası ətraflı təsvir edilmişdir.

Açar sözlər: maqnit separatoru; neodim maqnit; emulsiyalaşmış neft; yüksək dispersli maqnetit; ferromaqnit kartric.