

УДК 622.276.031

МАГНИТНАЯ КОАГУЛЯЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ

Шайдаков Е.В., Полетаева О.Ю.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа
e-mail: ol612@mail.ru*

Шайдаков В.В.

ООО «Инжиниринговая компания «Инкомп - нефть», г. Уфа

Уметбаев В.В.

ООО «Башнефть - Добыча» г. Уфа

Катрич Н.М.

ОАО «Славнефть-Мегионнефтегаз», г. Мегион

Балапанов Д.М.

Института механики Уфимского научного центра РАН, г. Уфа

Аннотация. *Рассмотрены вопросы магнитной коагуляции механических примесей в потоке жидкости и дальнейшего удаления их фильтрованием. На основе баланса сил, действующих на частицу на магнитной поверхности и в потоке жидкости, выявлено влияние режима течения жидкости, размеров постоянных магнитов, состава перекачиваемой жидкости и механических примесей на эффективность коагуляции частиц. Представлены лабораторные исследования влияния на формирования агломерата связующего компонента (например, нефти в воде), а также результаты очистки сточной воды с использованием устройств магнитной обработки жидкости и фильтров грубой и тонкой очистки.*

Ключевые слова: *коагуляция, магнитная сила, сила гидродинамического сопротивления, турбулентный режим, ламинарный режимы, механические примеси, нефтепродукты*

В скважинной продукции нефтяных и газовых месторождений в том или ином количестве присутствуют механические примеси. В основном это выносимые частицы горных пород и продукты коррозии металла оборудования и труб. Наиболее распространенные в нефтепромысловой практике методы удаления механических примесей, такие, как отстаивание, циклонирование и фильтрование, не всегда достигают требуемого эффекта. При магнитной же коагуляции механических примесей улавливаются частицы, обладающие магнитными свойствами, размером менее 5 мкм и объединяются в агломераты более 100 мкм, что позволяет повысить эффективность их удаления [1].

Для сточной пластовой воды, закачиваемой в систему ППД, тонкая очистка наиболее актуальна, так как, в зависимости от проницаемости пласта, содержание

механических примесей, регламентируемое ОСТ 39-225-88, составляет от 3 до 50 мг/л, а нефтепродуктов – от 5 до 50 мг/л.

Разработанные Инжиниринговой компанией «ИНКОМП-нефть» коагуляторы, внедренные в нефтяных компаниях «Башнефть», «РИТЭК», ТНК-ВР, позволяют выделять частицы сульфидов и оксидов железа размером 5-10 мкм из потока жидкости и газа, укрупнять их в агломераты размером более 100 мкм и в дальнейшем удалять фильтрованием. Конструктивно они состоят из корпуса (трубы диаметром 159...520 мм) с размещенными в нем плоскими перегородками, на которых установлена система из постоянных точечных магнитов цилиндрической формы [2, 3].

При расчете магнитной системы учитываются режим течения, состав и концентрация механических примесей с тем, чтобы под действием магнитного поля укрупнялись даже частицы с низкой магнитной восприимчивостью. Началом процесса является осаждение и закрепление частицы на магнитной поверхности.

Соотношение сил магнитной F_m и гидродинамического сопротивления F_c позволяет либо закрепляться частице на магните, либо препятствует этому процессу. Для того, чтобы частица закрепилась на магнитной поверхности в начальный момент необходимо выполнения условия $F_{mp} > F_c$, причем $F_{mp} = kF_m$, где k – коэффициент трения [4].

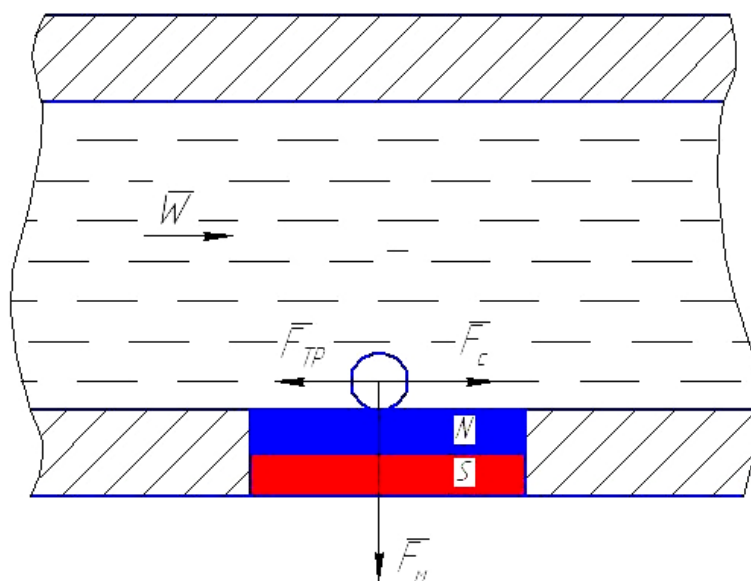


Рис. 1. Силы, действующие на частицу, находящуюся на магните в потоке жидкости

Мы принимаем, что закрепление частицы на магнитной поверхности может происходить лишь под действием магнитной силы F_m . Действие сил адгезии, поверхностного натяжения не учитывали, так как они только способствуют лучшему закреплению частицы. Также не учитывались сила тяжести и подъемная.

Сила гидродинамического сопротивления, является составляющей главного вектора гидродинамического воздействия жидкости на частицу, совпадающей с направлением вектора скорости потока, под действием которой частица смещается относительно поверхности контакта [4, 5] и определяется по формуле

$$F_c = c_x S_{ж} W^2 / 2, \quad (1)$$

где S – площадь миделева сечения частицы; W – скорость потока на уровне центра тяжести миделева сечения частицы; c_x – коэффициент лобового сопротивления.

При расчете силы F_c учитывались: 1) режим течения; 2) распределение скоростей потока между пластинами; 3) толщина ламинарного слоя (при наличии); 4) коэффициент лобового сопротивления в ламинарном и турбулентном слоях

При расчете взаимодействия частицы с постоянным магнитом цилиндрической формы было предположено, что материал магнита является однородным и изотропным ферромагнетиком, и вектор намагниченности I (А/м) направлен вдоль оси цилиндра. Магнитное поле, создаваемое таким магнитом, будет аналогично полю однослойного соленоида с бесконечно тонкой обмоткой, геометрически соответствующей боковой поверхности магнита, по которой течет намагничивающий ток J (А). Условием эквивалентности магнита и соленоида является равенство их магнитных моментов [6 - 9].

Магнитный момент магнита

$$M = I V = I S b, \quad (1)$$

где V – объем магнита, m^3 ; S – площадь сечения, m^2 ; b – высота магнита, м.

Магнитный момент эквивалентного соленоида:

$$M = i b S n, \quad (2)$$

где $i = J/b$ – линейная плотность намагничивающего тока, А/м; n – единичный вектор вдоль оси соленоида.

При сравнении (1) и (2) найдено: $I = i$.

Вектор намагниченности связан с остаточной индукцией магнита B следующим образом [6]:

$$I = B / \mu_0, \quad (3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная.

Далее была введена цилиндрическая система координат (ρ, φ, z) (рис. 2) с началом в геометрическом центре магнита.

Для расчета внешнего магнитного поля H (А/м), создаваемого магнитом, был использован закон Био-Савара в общем виде [7]:

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{[\mathbf{j}(\mathbf{r}') \times |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|]}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} dV', \quad (4)$$

где $\mathbf{j}(\mathbf{r}') = \mathbf{e}_\varphi i \delta(\rho' - R) = \mathbf{e}_\varphi I \delta(\rho' - R) = \mathbf{e}_\varphi \frac{B \delta(\rho' - R)}{\mu_0}$ – поверхностная плотность намагничивающего тока, А/м²; \mathbf{r} и \mathbf{r}' – радиус-векторы точки наблюдения поля и

элемента тока соответственно; \mathbf{e}_φ – азимутальный орт; $\delta(\rho' - R)$ – дельта функция Дирака, 1/м; R – радиус цилиндрического магнита, м.

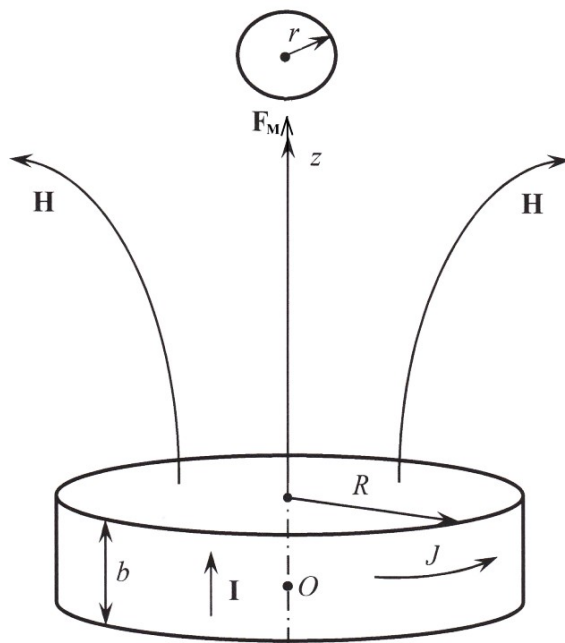


Рис. 2. Схема для определения магнитной силы, действующей на частицу

Учитывая, что радиальная j_r и аксиальная j_z компоненты плотности тока равны нулю, расписываются компоненты \mathbf{H} из (4) по осям координат:

$$H_r = \frac{B}{4\pi\mu_0} \int_0^{2\pi} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{R(z-z') d\varphi' dz'}{(\rho^2 + R^2 - 2\rho R \cos(\varphi - \varphi') + (z-z')^2)^{\frac{3}{2}}};$$

$$H_\varphi = 0;$$
(5)

$$H_z = \frac{B}{4\pi\mu_0} \int_0^{2\pi} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{R(R - \rho \cos(\varphi - \varphi')) d\varphi' dz'}{(\rho^2 + R^2 - 2\rho R \cos(\varphi - \varphi') + (z-z')^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

Сила f_B (Н/м³), действующая на единицу объема ферромагнитной частицы со стороны магнитного поля, равна [6]:

$$f_B = \frac{1}{2} \mu_0 \chi (\mathbf{H} \cdot \nabla) \mathbf{H},$$
(6)

где χ – магнитная восприимчивость частицы, \mathbf{H} – напряженность магнитного поля, μ_0 – магнитная постоянная, ∇ – оператор набла.

Далее определялась сила, действующую на шаровидную частицу радиуса r , находящуюся на поверхности магнита, вблизи центра. Напряженность магнитного

поля на оси элементарного кольцевого тока, текущего по боковой поверхности цилиндра [9]:

$$dH_z = \frac{R^2 i dz'}{2(R^2 + (z - z')^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (7)$$

где z и z' – аксиальные координаты точки наблюдения и элемента тока соответственно; R – радиус магнита; i – вектор намагниченности ($i = B/\mu_0$); B – остаточная намагниченность магнита. Учитывая принцип суперпозиции магнитных полей, было проинтегрировано (7) по z' и получено осевое поле тока, текущего по всей цилиндрической поверхности магнита:

$$H_z = \frac{B}{2\mu_0} \left(\frac{z + \frac{b}{2}}{\sqrt{R^2 + \left(z + \frac{b}{2}\right)^2}} - \frac{z - \frac{b}{2}}{\sqrt{R^2 + \left(z - \frac{b}{2}\right)^2}} \right). \quad (8)$$

Подстановкой (8) в (6) была найдена сила F_m , действующая на частицу, находящуюся в центре на поверхности цилиндрического магнита.

В результате расчета сил гидродинамического сопротивления и магнитной было выявлено влияние режима течения, состава механических примесей, т.е. магнитной восприимчивости и размера частиц, а также размера магнита на процесс коагуляции частиц.

Так, например, для устройства, где следующие характеристики потока: средняя скорость $W_{cp} = 1,8$ м/с, число Рейнольдса 42001, толщина ламинарного слоя 558 мкм, на рис. 3, 5 показана возможность удержания частиц магнетита и гематита диаметром от 10 до 100 мкм.

На рис. 3 видно, что сила трения для магнетитовой частицы превышает силу гидродинамического сопротивления, поэтому в данном потоке на магните могут удерживаться частицы магнетита. А для гематитовой частицы размером 10-100 мкм сила гидродинамического сопротивления превышает силу трения (рис. 4). Эти частицы находятся в ламинарном слое, где высокое значение силы гидродинамического сопротивления формируется за счет большого значения коэффициента лобового сопротивления ($c_x = 4,9$ в ламинарном слое, $c_x = 0,4$ в турбулентном слое), тогда как скорость потока на уровне миделева сечения частиц W меняется незначительно. На частицы магнетита по сравнению с гематитовыми действует на много большая магнитная сила за счет значительно большей его магнитной восприимчивости, поэтому частицы магнетита удерживаются на магнитной поверхности, а частицы гематита в связи со слабой магнитной силой на магнитной поверхности удержаться не способны.

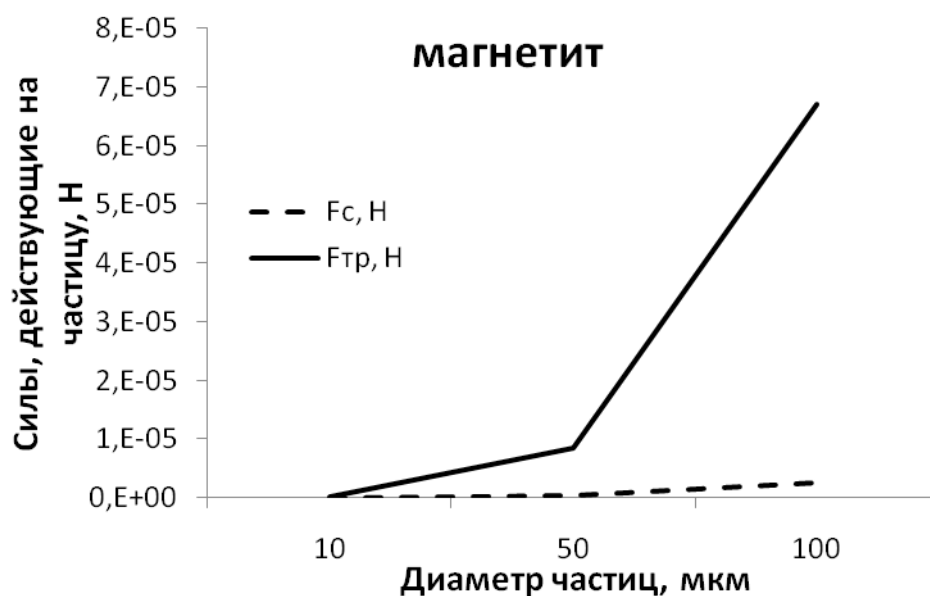


Рис. 3. Силы действующие на магнетитовую частицу ($\chi = 6,36$) в ламинарном слое находящуюся на поверхности магнита диаметром 10 мм

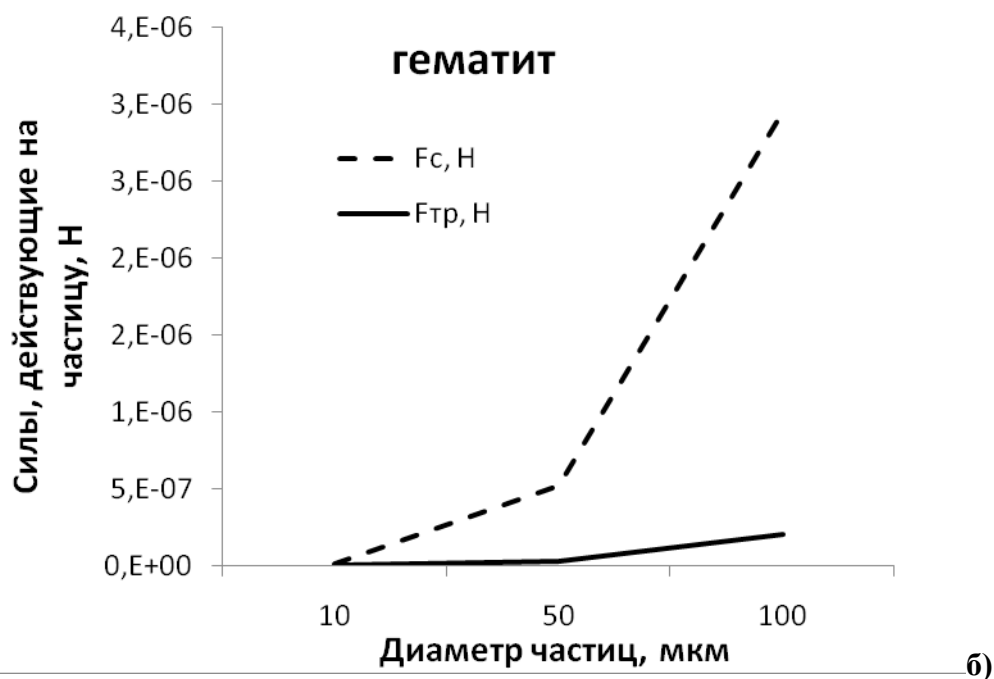


Рис. 4. Силы, действующие гематитовую частицу ($\chi = 0,019$) в ламинарном слое находящуюся на поверхности магнита диаметром 10 мм

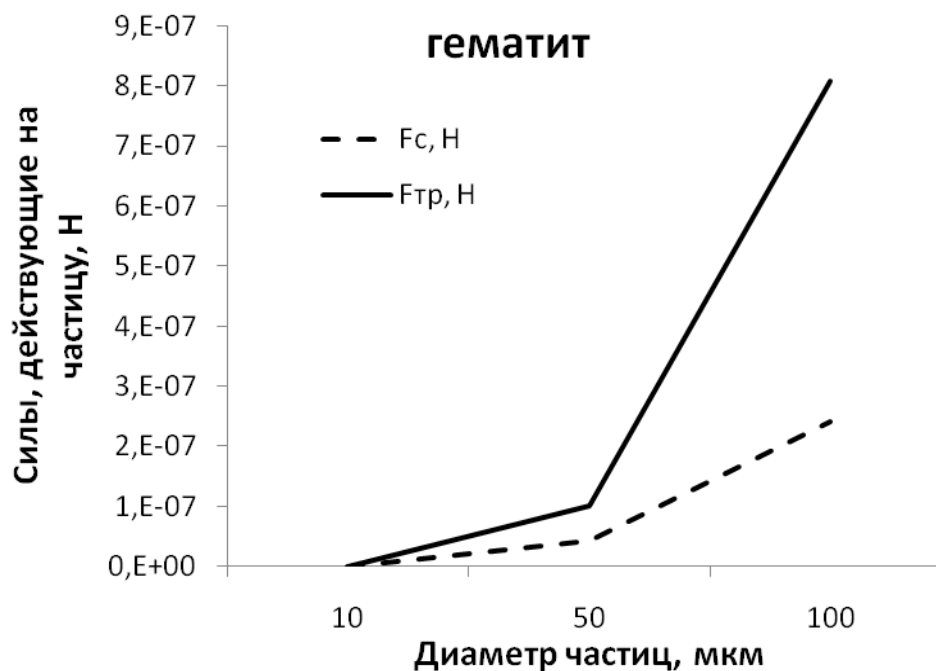


Рис. 5. Силы действующие на гематитовую частицу ($\chi = 0,019$) в ламинарном слое находящуюся на поверхности магнита диаметром 3 мм

При изменении режима течения у магнитной поверхности меняется коэффициент лобового сопротивления и скорость потока и соответственно сила гидродинамического сопротивления, а при изменении диаметра магнита меняется магнитная сила, действующая на частицу. Изменяя параметры магнита и режим течения можно добиться условий, когда и частицы с низкой магнитной восприимчивостью будут удерживаться на магните. Так при турбулентном течении у магнитной поверхности на магните диаметром 3 мм удерживаются частицы гематита диаметром 10-100 мкм (рис. 5).

Если изменять режим течения, размеры магнитов, можно воздействовать на процесс магнитодинамической коагуляции, создавать, например, условия только для фильтрации; для коагуляции; для очистки поверхности магнитов от механических примесей [10].

При срыве агломератов с магнита важно обеспечить их целостность в турбулентном потоке. Для визуальной оценки процесса коагуляции разработан стенд, включающий стеклянный трубопровод. Вода из бака подавалась центробежным насосом ЦМЛ50/224-2,2/4 в стеклянный трубопровод, и далее в сливной бак. Модель коагулятора состояла из стеклянного корпуса, в котором размещались постоянные магниты. От коагулятора до сливного бака протяженность трубопровода составила 10 м. Расходомером контролировался расход жидкости. В бак подавались ферромагнитные частицы размером около 10 мкм. Скорость потока в трубопроводе составляла 1..2 м/с.

В стендовых условиях визуально, с использованием высокоскоростной съемки, было подтверждено, что агломераты не распадаются после срыва с поверхности магнита. Было оценено влияние связующего компонента в воде на процесс коагуляции и сохранения размеров укрупненных частиц в потоке.

Известно, что коагулированные скопления частиц сохраняются в потоке вследствие действия сил остаточной намагниченности и связующих свойств веществ, присутствующих в жидкости. Например, в воде системы ППД присутствует незначительное количество нефти, которая будет связывать укрупненные агломераты. В бак добавляли связующий компонент, в качестве которого использовали индустриальное масло И-20 в количестве 0,1 % от массы частиц.

Частицы из потока воды скапливались на магните, коагулировали, а затем в виде агломерата срывались потоком (срыв агломерата происходит, когда сила гидродинамического сопротивления становится больше силы трения).

На рис. 6 можно увидеть, что после прохождения коагулятора агломераты сохраняются в потоке, как для чистых частиц (рис. 6а), так и частиц с маслом (рис. 6б). Причем видно, что агломераты со связующим компонентом гораздо крупнее.

На рис. 7 представлены фотографии частиц на магните коагулятора. Видно, что чистые частицы формируют на поверхности под действием магнитного поля агломераты более игольчатой формы (рис. 7а), а частицы со связующим компонентом – агломераты более округлой формы (рис. 7б).

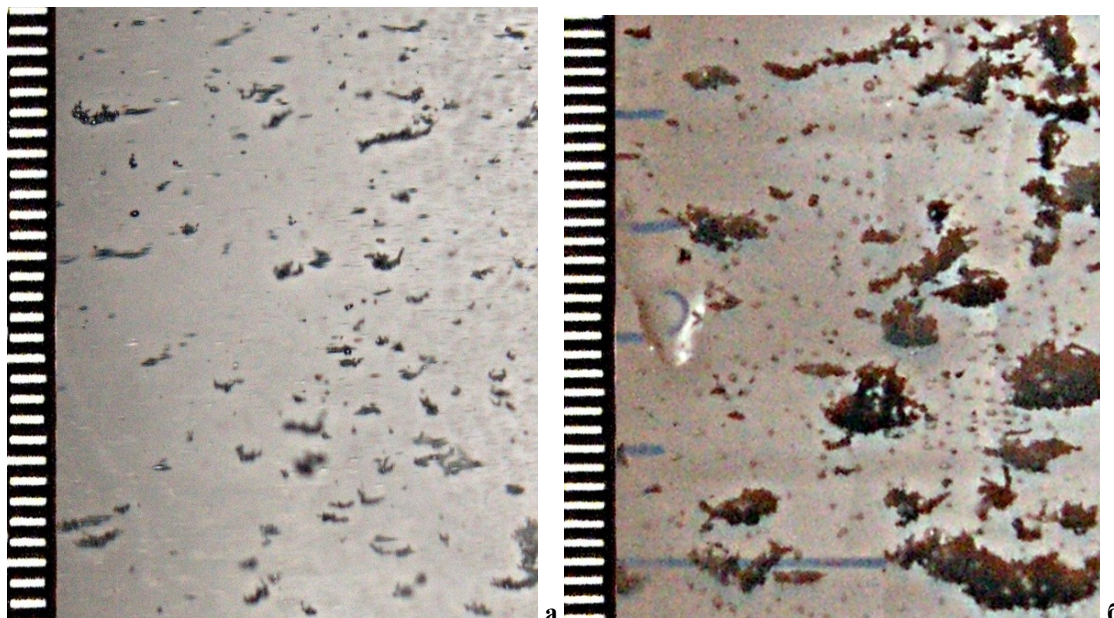


Рис. 6. Ферромагнитные частицы в воде после магнитной обработки:
а) без связующего компонента; б) со связующим компонентом

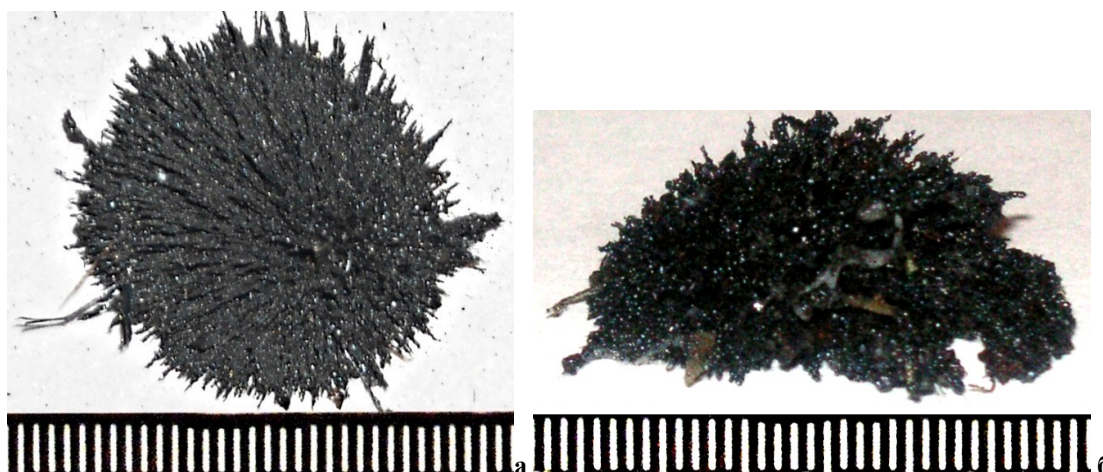


Рис. 7. Ферромагнитные частицы на магните:
а) без связующего компонента; б) со связующим компонентом

Как известно, коэффициент лобового сопротивления также зависит от формы обтекаемой частицы. При одном и том же числе Re коэффициент лобового сопротивления для частицы шарообразной формы является наименьшим [3], поэтому для достижения силы сопротивления, необходимой для срыва с магнита шарообразного агломерата частиц, сам агломерат должен быть большего размера по сравнению с агломератом имеющим менее шаровидную форму. Таким образом, связующий компонент способствует не только сохранению агломерата в потоке, но и формированию агломерата большего размера, что является важным для дальнейшей фильтрации, так как позволяет увеличить тонкость фильтрации, и, тем самым, уменьшить гидравлическое сопротивление.

Рассчитанное по результатам экспериментальных данных устройство для коагуляции ферромагнитных примесей (коагулятор) было установлено 16.12.2008 г. на водоводе между резервуаром с пластовой водой и системой фильтров дожимной насосной станции «Бузовьязы» Уфимского УДНГ филиала ОАО АНК «Башнефть» «Башнефть - Уфа» (рис. 8, 9) с целью повышения эффективности удаления механических примесей фильтрованием, позволяющее улучшить качество закачиваемых в пласт вод.

После установки коагулятора изменилась периодичность очистки фильтров грубой и тонкой очистки и приемной сетки насосов с 7 суток до 3 суток.

Отбор проб воды производился в трех точках – на выходе из резервуара перед коагулятором, после коагулятора до фильтров грубой и тонкой очистки, после фильтров грубой и тонкой очистки. Анализ проб в период эксплуатации системы очистки с 1.02.2009 г. по 31.03.2009 г. показал, что содержание нефтепродуктов в сточной воде снижается на 36 %, а содержание механических примесей на 23 % (рис. 10).

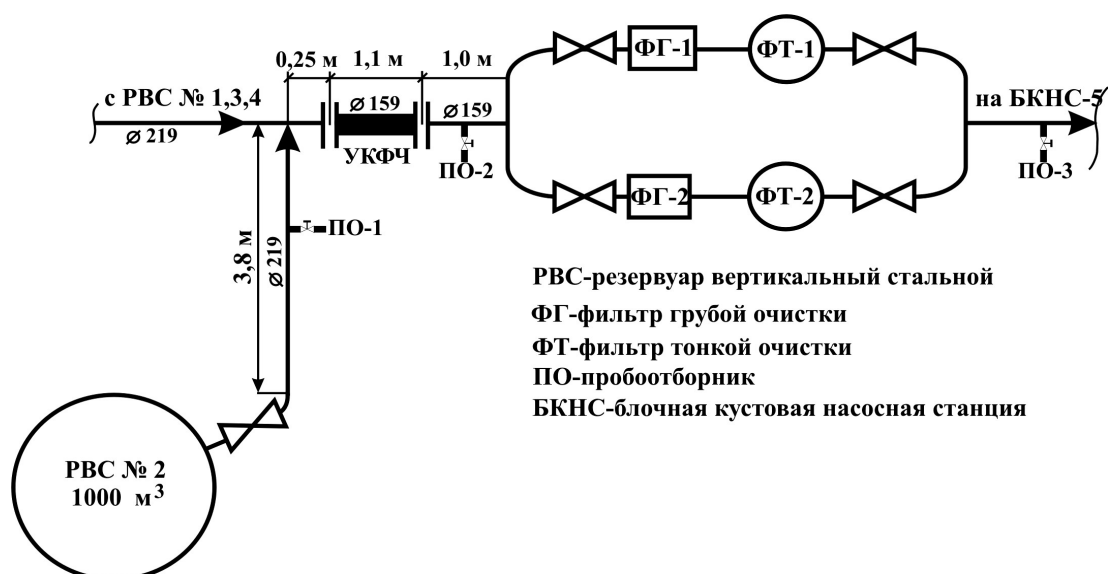


Рис. 8. Схема очистки пластовой воды с установленным коагулятором на водоводе дожимной насосной станции «Бузовьязы» Уфимского УДНГ



Рис. 9. Коагулятор перед системой фильтров на водоводе дожимной насосной станции «Бузовьязы» Уфимского УДНГ

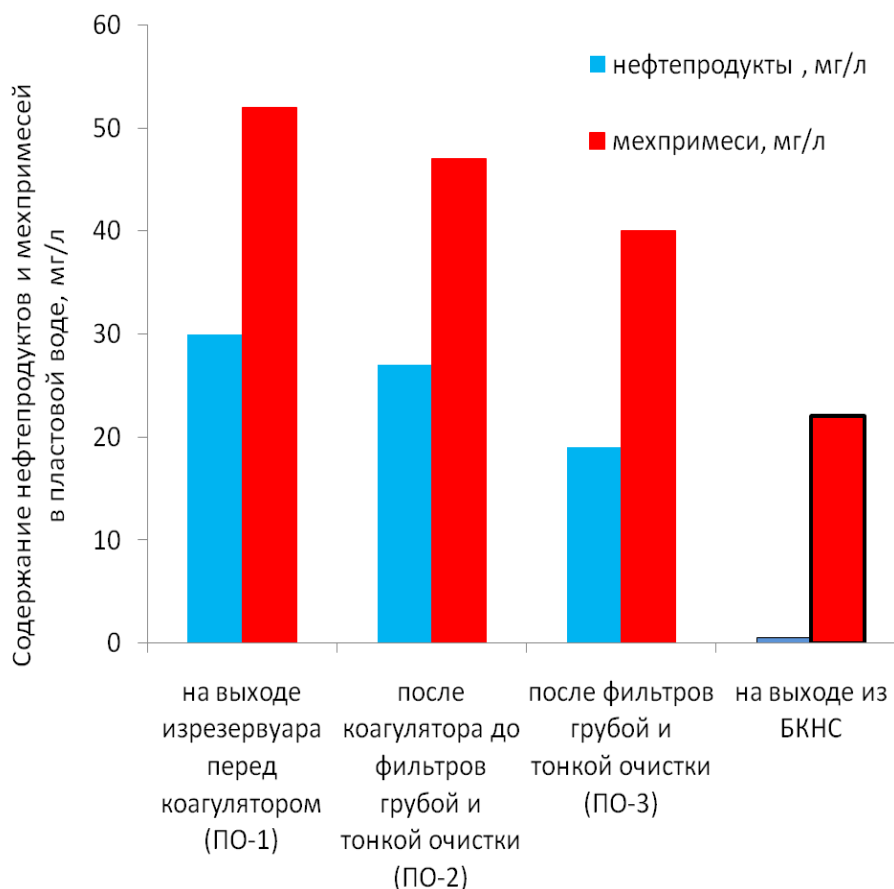


Рис. 10. Эффективность очистки пластовой воды на водоводе дожимной насосной станции «Бузовьязы» Уфимского УДНГ

Известно, что мехпримеси и нефтепродукты собираются на приемной сетке насосов, нагнетающих воду в скважины, поэтому для анализа был собран осадок с фильтров грубой и тонкой очистки, а также с приемного фильтра насоса. На приемном фильтре насосного агрегата отфильтровалось 64 % всех примесей. В результате, в целом, эффективность очистки воды от нефтепродуктов составила 98 %, механических примесей 58 %. На рис. 11 представлены расчетные данные содержания мехпримесей и углеводов в сточной воде после приемного фильтра насоса.

Так, на основе результатов промышленных испытаний, доказано, что при установке коагулятора повышается качество очистки воды не только от механических примесей, но и от нефтепродуктов.

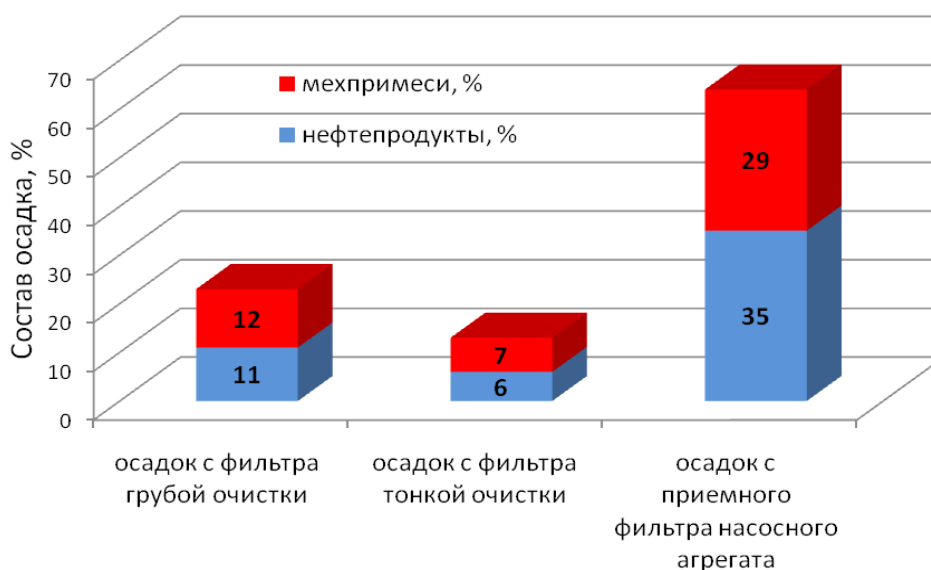


Рис. 11. Содержание мехпримесей и нефтепродуктов в осадках с фильтров

Таким образом, можно заключить, что на процесс очистки потока жидкости от ферромагнитных примесей помимо параметров магнитного поля, влияют размеры постоянных магнитов, режим течения жидкости в плоскости расположения магнитов, магнитная восприимчивость материала частиц, наличие связующего компонента в потоке. Изменяя режим течения, размеры и расположение магнитов можно воздействовать на процесс магнитодинамической коагуляции, создавать например, условия только для фильтрации, для коагуляции, очистки поверхности магнитов от механических примесей.

Литература

1. Ибрагимов Н.Г., Хафизов А.Р., Шайдаков В.В. и др. Осложнения в нефтедобыче. Уфа: «Монография», 2003. 302 с.
2. Патент № 71976 РФ, МПК С 02 F 1/48. Устройство для удаления ферромагнитных частиц из потока жидкости или газа / В.В. Шайдаков, М.В. Мусаев, Е.В. Шайдаков, О.Ю. Полетаева, К.В. Чернова, Ф.Я. Канзафаров, О.Е. Гамолин, В.Н. Педорич, В.В. Рудой; ООО «Инжиниринговая компания «Инкомп-нефть». - № 2007146510/22; заявлено 12.12.2007; опубл.27.03.2008 // Бюл. Год 2008. № 9. С. 32.
3. Патент № 69859 РФ, МПК С 02 F 1/48 Устройство для коагуляции ферромагнитных частиц жидкости и газа / В.В. Шайдаков, М.В. Мусаев, К.В. Чернова, О.Ю. Полетаева, Е.В. Шайдаков; ООО «Инжиниринговая компания «Инкомп-нефть». - № 2007136705/22; заявлено 03.10. 07; опубл.10.01.2008 // Бюл. Год 2008. № 1. С. 13.

4. Гейер В.Г., Дулин В.С., Боруменский А.Г., Заря А.Н. Гидравлика и гидропривод : учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Недра, 1981. 295 с.
5. Рабинович Е.З. Гидравлика: учебное пособие для вузов. М: Недра, 1980. 278 с.
6. Калашников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2003. 624 с.
7. Алексеев А.И. Сборник задач по классической электродинамике. М.: Наука, 1977. 318 с.
8. Россель Ж. Общая физика. М.: Мир, 1964. 508 с.
9. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. III. Электричество и магнетизм. М.: Физматлит, 2006. 232 с.
10. Шайдаков В.В., Урманчиев В.В., Полетаева О.Ю., Балапанов Д.М., Мусаев В.М., Шайдаков Е.В. Коагуляция механических примесей в потоке жидкости // Нефтепромысловое дело. 2009. № 9. С. 53-55.

MAGNETIC COAGULATION OF MECHANICAL IMPURITIES

*E.V. Shaidakov, O.Yu. Poletaeva,
Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia*

V.V. Shaidakov
Engineering company "Incomp - neft", Ufa, Russia

V.V. Umetbaev
"Bashneft – Dobycha" LLC, Ufa, Russia

N.M. Katrich
"Slavneft-Megionneftegas" JSC, Megion, Russia

D.V. Balapanov
Institute of Mechanics of Ufa Branch RAS, Ufa, Russia

Abstract. *Questions magnetic coagulation of mechanical impurities in the fluid flow and filtration remove them are discussed in this article. On efficiency of particle coagulation, the effect of fluid flow regime, the size of the permanent magnets of the fluid, solids was determined. Laboratory studies of the influence of a binder (eg, oil in water) on the formation of sinter from waste water using devices, magnetic treatment of fluid and filters for coarse and fine purification are presented in this paper.*

Keywords: *magnetic force, coagulation, particle, drag force, drag coefficient, turbulent and laminar flow regimes, binders, mechanical impurities, oil*

References

1. Ibragimov N.G., Khafizov A.R., Shaidakov V.V. i dr. *Oslozhneniya v nefte-dobyche (Petroleum production problems)*. Ufa: "Monografiya", 2003. 302 p
2. Patent № 71976 of Russian Federation. IPC C02 F1/48. A device for removing ferromagnetic particles from the fluid flow / V.V. Shaidakov, M.V. Musaev, E.V. Shaidakov, O.Yu. Poletaeva, K.V. Chernova, F.Ya. Kanzafarov, O.E. Gamolin, V.N. Pedorich, V.V. Rudoj; publ. 27.03.2008.
3. Patent № 69859 of Russian Federation, IPC C02 F1/48. A device for the coagulation of the ferromagnetic particles of liquid and gas / V.V. Shaidakov, M.V. Musaev, K.V. Chernova, O.Yu. Poletaeva, E.V. Shaidakov; publ. 10.01.2008.
4. Geier V.G., Dulin V.S., Borumenskii A.G., Zarya A.N. *Gidravlika i gidroprivod : uchebnik dlya vuzov (Hydraulics and hydraulic drive systems. Textbook)*. 2 ed. Moscow: Nedra, 1981. 295 p.
5. Rabinovich E.Z. *Gidravlika: uchebnoe posobie dlya vuzov (Hydraulics. Textbook)*. Moscow: Nedra, 1980. 278 p.

6. Kalashnikov S.G. Elektrichestvo(Electricity). Moscow: Fizmatlit, 2003. 624 p.
7. Alekseev A.I. Sbornik zadach po klassicheskoi elektrodinamike (Problems in classical electrodynamics). Moscow: Nauka, 1977. 318 p.
8. Rossel' Zh. Obshchaya fizika (General physics). Moscow: Mir, 1964. 508 p.
9. Sivukhin D.V. Obshchii kurs fiziki. T. III. Elektrichestvo i magnetizm (General physics course. Vol. III. Electricity and magnetism). Moscow: Fizmatlit, 2006. 232 p.
10. Shaidakov V.V., Urmancheev V.V., Poletaeva O.Yu., Balapanov D.M., Musaev V.M., Shaidakov E.V. Koagulyatsiya mekhanicheskikh primesei v potoke zhidkosti (Mechanical impurities coagulation in liquid flow), *Neftepromyslovoe delo*, 2009, Issue 9, pp. 53-55.