

Магнитная обработка газового потока для удаления механических примесей

В.В. Шайдаков

д.т.н., директор¹
incompneft@yandex.ru

Е.В. Шайдаков

технический директор¹
incompneft@yandex.ru

А.С. Тотанов

управляющий²
incompneft@yandex.ru

¹ООО «Инжиниринговая компания «Инкомп-нефть», Уфа, Россия
²ООО «Самара-ЭлектроСервис», Самара, Россия

В статье рассмотрено влияние температуры, давления и скорости перекачки газа, размеров постоянных магнитов, состава механических примесей, а именно их магнитной восприимчивости, на эффективность коагуляции частиц в потоке газа. Используются теории газовой динамики, магнитного поля. Предложено устройство для магнитной обработки потока газа, рекомендации по очистке попутного газа на компрессорной станции с целью предотвращения нагарообразования в компрессоре высокого давления.

Материалы и методы

Аналитические методы исследования, основанные на теории магнитного поля и теории газовой динамики.

Ключевые слова

коагуляция, магнитная сила, постоянный магнит, магнитная восприимчивость, попутный нефтяной газ, сила сопротивления потока, коэффициент лобового сопротивления, скорость и давление газового потока

Попутный газ — ценнейшее углеводородное сырье, имеющее массу возможных вариантов переработки, а также использования его в качестве рабочего агента для добычи нефти газлифтным способом, поддержания пластового давления. С каждым годом объемы использования попутного нефтяного газа неуклонно растут, но темпы роста нельзя признать удовлетворительными. Это связано с достаточно дорогостоящими и сложными технологиями подготовки попутного газа. Одной из наиболее сложных технологически и затратных материально является удаление из попутного газа механических примесей. Традиционно применяемые для этого технологии фильтрации и циклонирования не обеспечивают достаточной эффективности, либо технические средства для их реализации слишком материалоемки и дороги, как в приобретении, так и в обслуживании.

Решающим фактором для выбора технологии использования газа является его состав, определяющий не только возможные технологии его использования, но и выбор технических решений по его промышленной подготовке. В отличие от природного газа попутный нефтяной газ содержит в своем составе кроме метана и этана большую долю пропанов, бутанов и паров более тяжелых углеводородов. Во многих попутных газах, в зависимости от месторождения, содержатся также сероводород и меркаптаны, углекислый газ, азот, гелий и аргон.

Кроме газообразной составляющей, попутные газы содержат минерализованную воду, механические примеси представляют собой сочетание породобразующих компонентов, продуктов коррозии, соли.

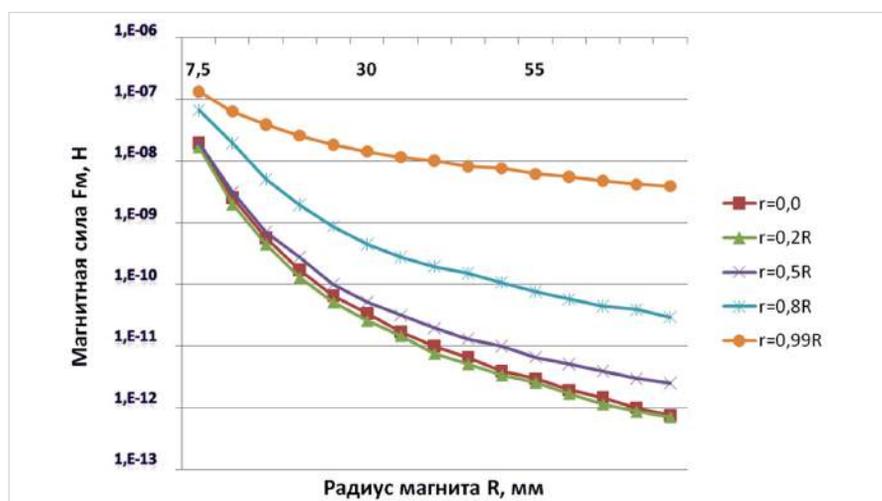


Рис. 1 — Зависимость магнитной силы, действующую на гематитовую частицу (магнитная восприимчивость 0,019) диаметром 10 мкм, от радиуса магнита (r — расстояние между положением частицы на магните и осью магнита).

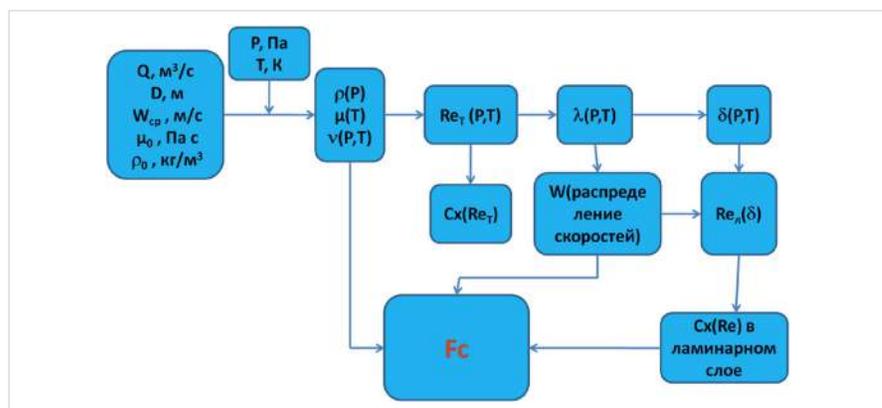


Рис. 2 — блок-схема определения силы сопротивления частицы, находящейся на магнитной поверхности, в газовом потоке

Q — объемный расход газа; D — линейный размер (в случае круглого сечения — диаметр); W_{cp} — средняя скорость течения; μ_0 — динамический коэффициент вязкости при 0°C; ρ_0 — плотность газа при нормальных условиях ($\rho_0=101,3$ кПа); ν — кинематический коэффициент вязкости; p, T — давление и температура газа; Re_t — число Рейнольдса в турбулентном потоке; λ — коэффициент гидравлического трения; δ — толщина ламинарного слоя; Re_n — число Рейнольдса в ламинарном слое; C_x — коэффициент лобового сопротивления; W — скорость потока на уровне центра тяжести миделева сечения частицы (распределение скоростей по сечению).

Механические примеси в попутном нефтяном газе инициируют локальное разрушение металла внутренней поверхности труб и оборудования, приводят к образованию нагара на рабочих органах компрессоров. Согласно техническим требованиям к нефтяным газам, содержание твердой взвеси не должно превышать 0,05 мг/м³. Повышение же содержания механических примесей до 30 мг/м³ приводит к резкому увеличению скорости эрозионного разрушения металла газопроводов и оборудования. Удаление механических примесей из попутного газа вызывает интерес ввиду того, что, несмотря на значительный объем исследований и разработанных технологий, существующие методы несовершенны и не позволяют удалять механические примеси с необходимой чистотой. Методы удаления механических примесей из попутных газов можно подразделить на четыре группы — «сухое» улавливание, «мокрое» улавливание, магнитодинамические методы и комплексные, сочетающие несколько методов. Одним из эффективных методов очистки потока газа от механических примесей осуществляется с применением магнитных

установок. Под действием магнитного поля происходит коагуляция механических примесей и их дальнейшее эффективное отделение [1, 2].

Механизм магнитной коагуляции, заключающийся в закреплении на магнитной поверхности осажденных под действием магнитного поля частиц, образования из этих частиц агломератов, которые при достижении определенных размеров срываются потоком с магнитной поверхности. Далее укрупненные агломераты осаждаются или отфильтровываются. Аппараты для магнитной коагуляции выполняются на основе постоянных магнитов цилиндрической формы, закрепленных на пластинах, установленных в корпусе.

Началом процесса коагуляции является осаждение и закрепление частицы на магнитной поверхности. Соотношение сил магнитной F_M и 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 $F_{тр} > F_C$, причем $F_{тр} = kF_M$, где k — коэффициент трения.

Сила f_B , действующая на единицу объема

ферромагнитной частицы со стороны магнитного поля, равна [3, 4]:

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

где \mathbf{H} — напряженность магнитного поля; Δ — векторный дифференциальный оператор; χ — магнитная восприимчивость частицы; μ_0 — магнитная постоянная.

С учетом закона Био-Савара расписываются компоненты \mathbf{H} по осям цилиндрической системы координат (ρ, φ, z) :

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

$$H_\varphi = 0;$$

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

где B — остаточная намагненность, b — высота магнита, R — радиус магнита, ρ, φ, z и ρ', φ', z' — координаты точки наблюдения и элемента тока соответственно.

Для определения магнитной силы, действующей на частицу конечной величины, находящейся в различных точках магнитного

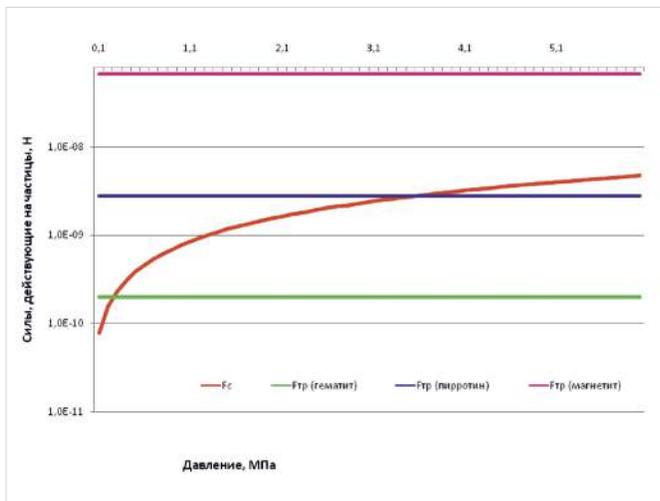


Рис. 3 — Силы, действующие на частицу диаметром 10 мкм, находящуюся на поверхности магнита в потоке газа ($W_{ср} = 5,7$ м/с)

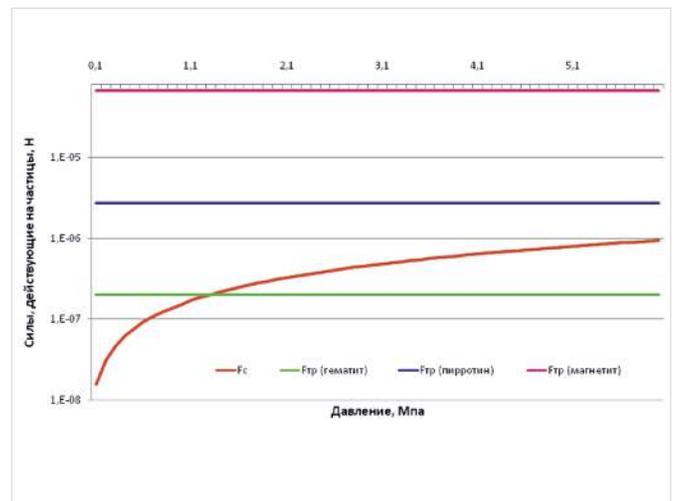


Рис. 5 — Силы, действующие на частицу диаметром 100 мкм, находящуюся на поверхности магнита в потоке газа ($W_{ср} = 5,7$ м/с)

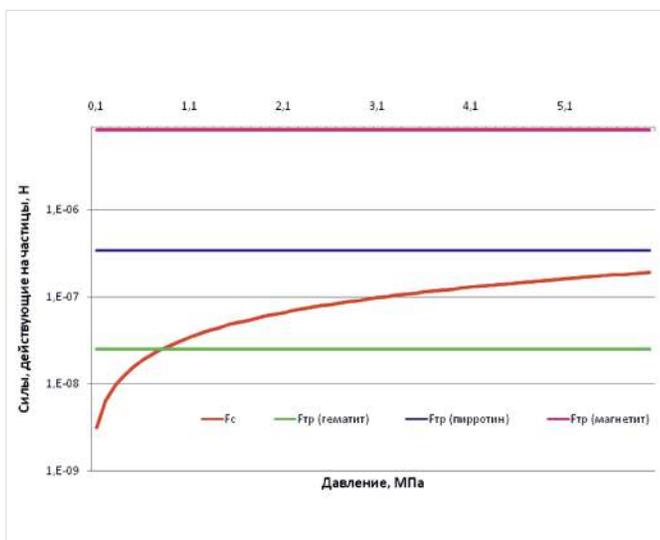


Рис. 4 — Силы, действующие на частицу диаметром 50 мкм, находящуюся на поверхности магнита в потоке газа ($W_{ср} = 5,7$ м/с)

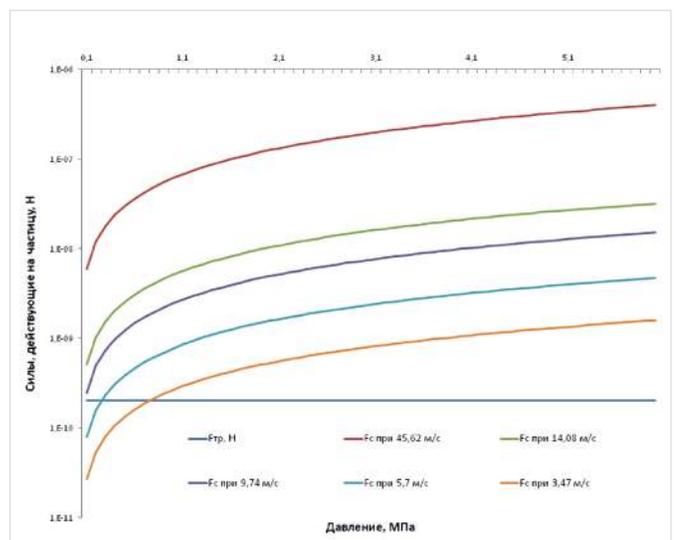


Рис. 6 — Силы, действующие на гематитовую частицу диаметром 10 мкм при разных скоростях потока

поля, созданного одним постоянным цилиндрическим магнитом, численно интегрировали уравнения (1) и (2) с помощью программного пакета Maple 11.

Выявлено что, сила, удерживающая частицу на поверхности магнита, с увеличением радиуса магнита уменьшается (Рис. 1). Связано это с тем, что для одного и того же значения остаточной намагниченности B плотность магнитной энергии вблизи поверхности будет больше у магнита меньшего объема, а магнитная сила, действующая на частицу, пропорциональна градиенту плотности магнитной энергии. Чем дальше частица находится от оси магнита, тем больше магнитная сила, удерживающая частицу на поверхности. Поэтому при дальнейшем определении условий для удержания частиц на магните, т.е. условий начала коагуляции, рассматривается случай, когда частица находится на оси магнита.

Когда частица конечной величины находится на поверхности и на оси магнита магнитную силу можно определить по формуле:

$$F_m = \frac{1}{6} \pi \gamma^3 c \frac{B^2 b (R^3 - (R^2 + b^2)^{\frac{3}{2}})}{\mu_0 R (R^2 + b^2)^2} \quad (3)$$

где γ — радиус частицы, м;
 χ — магнитная восприимчивость;
 R — радиус магнита, м;

b — высота магнита, м;
 B — остаточная намагниченность, Тл;
 μ_0 — магнитная постоянная, Н/А².

Силу сопротивления F_c определяли по формуле

$$F_c = c_x S \rho_r W^2 / 2,$$

где S — площадь миделева сечения частицы, W — скорость потока на уровне центра тяжести миделева сечения частицы, ρ_r — плотность газа, c_x — коэффициент лобового сопротивления [5].

Влиять на процесс коагуляции можно изменением магнитной силы за счет варьированием диаметра магнита, а также изменением режима течения газа.

Была решена задача, когда рассматривались частицы разной магнитной восприимчивости — 0,019 (Fe_3O_4), 0,26 (Fe_7S_8), 6,36 (Fe_3O_4), и диаметром 10, 50, 100 мкм находящиеся на поверхности магнита в потоке газа. Не учитывалось влияние соседних магнитов, намагниченность пластин.

Сила сопротивления частицы, находящейся на магнитной поверхности, в газовом потоке определялась для следующих параметров газового потока: температура 273–373 К; давление газа 0,1–6,0 МПа; средняя скорость газа 3,47–45,6 м/с. Свойства газа при 0°C и атмосферном давлении: $\mu_0 = 0,000162$ Па*с; $\nu_0 = 0,000151-0,000198$ м²/с; $\rho_0 = 0,82-1,07$ кг/м³. Исходные данные для расчета

магнитной силы: $B=1,15$ Тл, диаметр магнита 10 мм, высота магнита 10 мм.

Было выявлено, что температура не оказывает влияния на процесс крепления частицы на магнитной поверхности. Так для частиц диаметром 10 мкм сила сопротивления при давлении 3 МПа, при температуре 0°C составляет $2,3458 \cdot 10^{-9}$ Н. А при температуре 100°C при прочих равных условиях сила сопротивления составляет $2,3419 \cdot 10^{-9}$ Н.

Влияние же давления на процесс крепления частицы значимо (рис. 3–5). С увеличением давления перекачки газа увеличивается сила сопротивления, так как увеличивается плотность газа.

Частицы гематита ($\chi=0,019$) диаметром 10 мкм закрепляются на магнитной поверхности при давлении менее 0,2 МПа, так как сила трения превышает силу сопротивления, частицы пирротина ($\chi=0,26$) того же диаметра закрепляются при давлении менее 3,3 МПа, частицы магнетита ($\chi=6,36$) на магнитной поверхности закрепляются, в связи с тем что имеют высокое значение магнитной восприимчивости по сравнению с пирротинном и гематитом. Частицы пирротина и магнетита диаметром 50 мкм удерживаются на магнитной поверхности, так как в данном случае силы трения в 3 раза превышает силу сопротивления. Частицы гематита диаметром 50 мкм

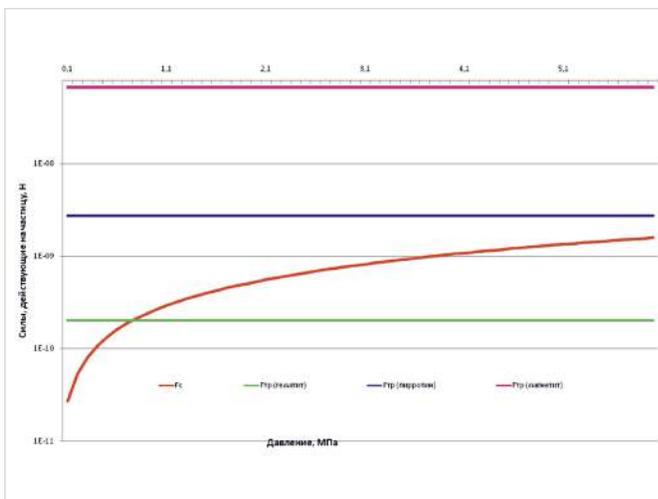


Рис. 7 — Силы, действующие на частицу диаметром 10 мкм, находящуюся на поверхности магнита в потоке газа ($W_{cp} = 3,47$ м/с)

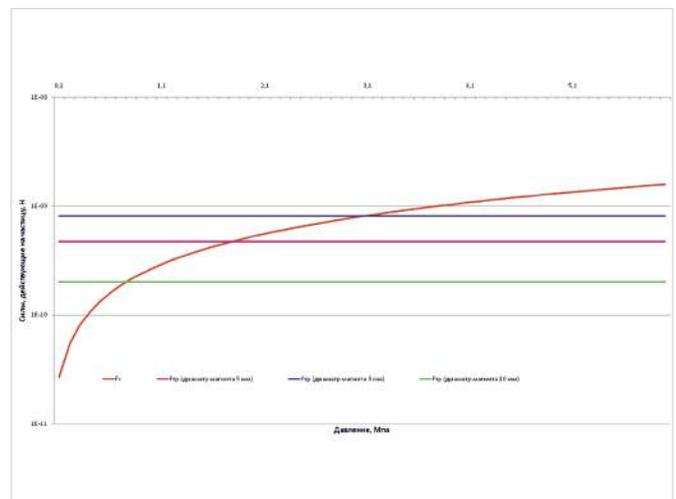


Рис. 8 — Силы, действующие на частицу диаметром 10 мкм, находящуюся на поверхности магнитов разного диаметра в потоке газа

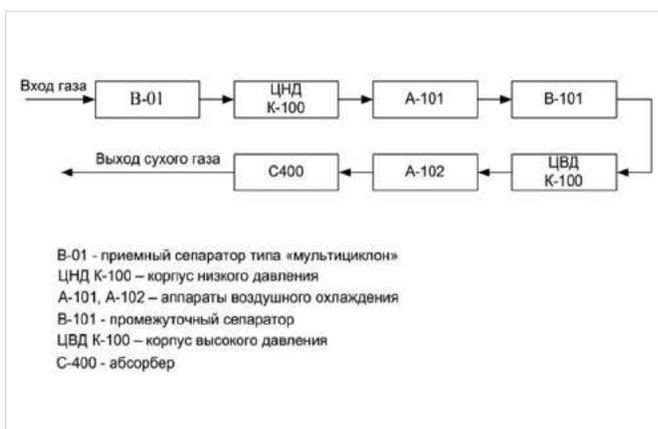


Рис. 9 — Схема компримирования и осушки газа

Компонент	Содержание, %	Компонент	Содержание, %
Углеводородная составляющая из них	58,3	Осадок из них	41,7
- парафино-нафтеновые углеводороды	68,7		
- ароматические углеводороды	16,8	- сульфид железа	32,4
из них			
- легкие арены	7,5		
- тяжелые арены	9,3	- оксид железа	8,3
- смолы	12		
- асфальтены	нет	Ca, Si, Cr, Ni	следы

Таб. 1 — Состав отложений в первой ступени компрессора высокого давления КС-20

при давлении менее 0,8 МПа не закрепляются на магнитной поверхности.

Частицы пирротина и магнетита диаметром 100 мкм удерживаются на магнитной поверхности, а частицы гематита этого диаметра на магните удерживаются при давлении перекачки менее 1,2 МПа.

Необходимо отметить, что расчет производился для реальных условий перекачки газа при давлении 2,74–3,92 МПа. При таких условиях частицы гематита менее 100 мкм, а также частицы пирротина диаметром 10 мкм на магнитной поверхности закрепиться не могут. Поэтому необходимо изменить либо условия перекачки, что может повлиять на режим работы всего оборудования, либо установить устройство, где будет изменена скорость потока газа. Были произведены расчеты также и для устройств диаметром 159, 273, 325, 426 и 530 мм. В случае увеличения скорости потока (при установке устройства меньшего диаметра) сила сопротивления только увеличивается и, как видно из рис. 6, при любом из расчетных давлений закрепления гематитовой частицы диаметром 10 мкм не произойдет, поэтому можно рассматривать вопрос только уменьшения скорости.

Расчет устройства диаметром 530 мм показал, что частицы пирротина и магнетита диаметром 10–100 мкм, имеющие более высокую магнитную восприимчивость по сравнению с гематитом закрепляются на магнитной поверхности при любом давлении (расчетный интервал 0,1–6 МПа), а вот частицы гематита диаметром 10 мкм закрепятся при давлении ниже 0,8 МПа (рис. 7), диаметром 50 мкм — ниже 2,3 МПа, диаметром 100 мкм — ниже 3,8 МПа. Для того чтобы гематитовые частицы диаметром 10 мкм закрепились на магните необходимо подобрать диаметр магнита. При

установке магнитов диаметром 3 мм возможно удержать частицы диаметром 10 мкм при давлении перекачки менее 3,1 МПа (рис. 8). Условия перекачки газа 2,74–3,92 МПа, поэтому при установке устройства диаметром 530 мм с установленными магнитами диаметром 3 мм возможно удержание частиц диаметром 10 мкм на магнитной поверхности. Важно создать в устройстве условия, когда частицы будут осаждаться на магнит, закрепляться на нем и образовывать крупные агломераты, которые и будут срываться потоком — такое устройство позволяет увеличить эффективность очистки потока от механических примесей, и позволяет устанавливать фильтрующий элемент сразу после устройства для коагуляции.

На основании данных расчетов было изготовлено устройство [5] для коагуляции и дальнейшей очистки газа на компрессорной станции.

Станция предназначена для подготовки нефтяного попутного газа и использования его в качестве рабочего агента для добычи нефти газлифтным способом. Компрессорная станция включает в себя машинный зал, в котором установлены три центробежных компрессора производства фирмы «Крезо-Луар» (Франция), маслосистему, установку регенерации триэтиленгликоля, воздушную компрессорную, аппаратный двор, аппараты воздушного охлаждения газа и масла, объекты электроснабжения, водоснабжения и канализации, факельное хозяйство и котельную (Рис. 9).

При компримировании газа в происходит интенсивный процесс нагарообразования на рабочих органах компрессоров, в связи с чем резко снижается их межремонтный период работы. Проведя исследования состава отложений первой ступени компрессора

высокого давления (Таб. 1) было выявлено, что основными компонентами являются сульфид железа, тяжелые углеводороды и оксид железа. Для снижения интенсивности нагарообразования необходимо удалить из газа перед компрессором низкого давления механические примеси в виде сульфидов и оксидов железа.

Для удаления из потока газа непосредственно перед компрессором оксидов и сульфидов железа, которые являются продуктами коррозии и взаимодействия металла труб с сероводородом, а так же частично углеводородной составляющей был установлен магнитный коагулятор типа УМЖ-530-0,1 (патенты РФ № 69859, 71976), который представляет собой трубу 530x8 мм с расположенными внутри неё параллельно потоку газа перфорированными металлическими пластинами, в отверстия которых в определенной последовательности закреплены постоянные высокоэнергетические магниты $Nd_2Fe_{14}B$. С целью защиты от коррозии внутренняя поверхность коагулятора покрыта специально разработанной трехкомпонентной цинконаполненной композицией.

Магниты по длине трубы создают магнитные поля разных напряженностей от 0,01 до 0,1 Тл по ходу движения газа, что позволяет улавливать ферромагнитные частицы различных магнитных восприимчивостей и различных размеров. Данный коагулятор был смонтирован после аппаратов воздушного охлаждения по ходу потока газа перед корпусом высокого давления (Рис. 10).

Использование магнитной обработки газа, путем установки магнитного коагулятора с фильтром, позволило существенно снизить нагарообразования в компрессорах.

Итоги

На основе аналитических исследований предложен процесс очистки попутного нефтяного газа от механических примесей с использованием устройства магнитной обработки потока газа.

Выводы

Установлено влияние температуры, давления и скорости потока газа на процесс крепления частицы разного диаметра и магнитной восприимчивости на магнитной поверхности, что является начальным этапом коагуляции частиц.

Список используемой литературы

1. Шайдаков Е.В. Очистка попутного газа от механических примесей. Уфа: Монография, 2010. 52 с.
2. Шайдаков В.В., Урманчиев С.Ф., Полетаева О.Ю., Балапанов Д.М., Мусаев М.В., Шайдаков Е.В. Коагуляция механических примесей в потоке жидкости // Нефтепромысловое дело. 2009. №9. С. 53–55.
3. Рабинович Е.З. Гидравлика. М: Недра, 1980. 278 с.
4. Россель Ж. Общая физика. М: Мир, 1964.
5. Шайдаков В.В., Мусаев М.В., Шайдаков Е.В., Полетаева О.Ю., Чернова К.В., Каззафаров Ф.Я., Гамалин О.Е., Педорич В.Н., Рудой В.В. Пат. 71976 Российской Федерации, МПК C02F 1/48. Устройство для удаления ферромагнитных частиц из потока жидкости или газа. ООО Инжиниринговая компания. Инкомп-нефть. № 2007146510/22; Заявлено 12.12.2007; опублик. 27.03.2008, № 9.

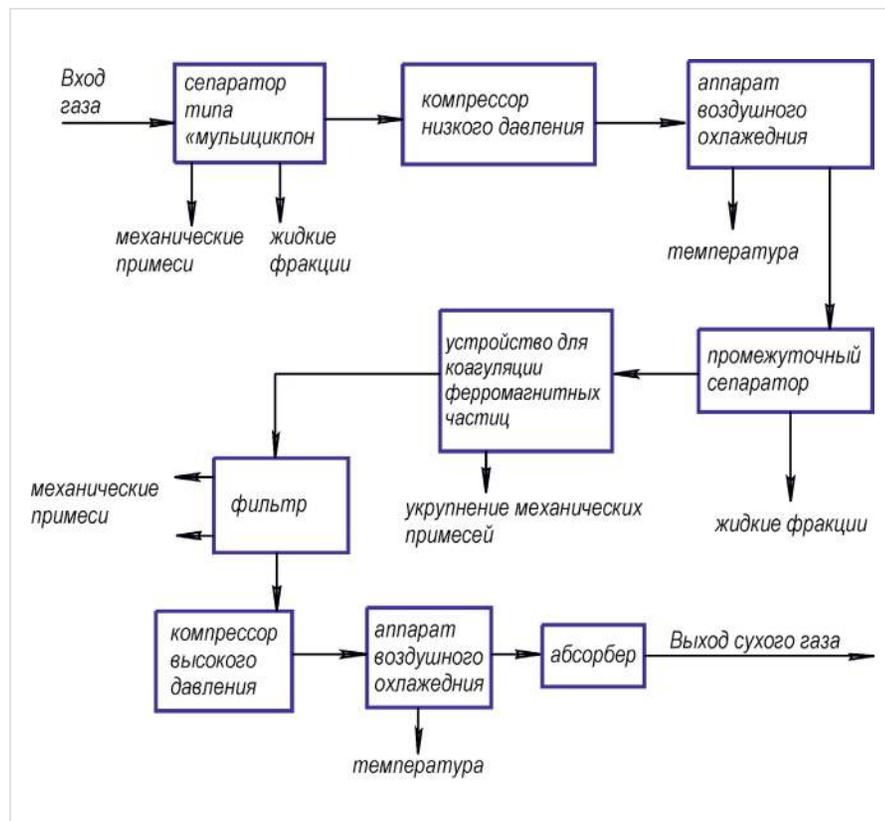


Рис. 10 — Усовершенствованная схема компримирования и осушки газа

Magnetic treatment of a gas stream to remove mechanical impurities

UDC 622.691

Authors:

Vladimir V. Shaydakov — ph.d, director¹; incompneft@yandex.ru
Evgeny V. Shaydakov — technical director¹; incompneft@yandex.ru
Alexander S. Totanov — managing director²; incompneft@yandex.ru

¹Incomp-neft Engineering Company JSC, Ufa, Russian Federation

²Samara-Elektroservice JSC, Samara, Russian Federation

Abstract

The article discusses the effect of temperature, pressure and speed pumping gas sizes of permanent magnets of mechanical impurities, namely their magnetic susceptibility, the efficiency of particle coagulation in the gas stream. Used the theory of gas dynamics, magnetic field. A device for magnetic treatment of a gas stream, cleaning advice associated gas compressor stations to prevent carbon formation in the high pressure compressor.

Materials and methods

Analytical methods, based on the theory of magnetic field and the theory of gas dynamics.

Results

On the basis of analytical researches process of purification of oil gas from mechanical impurity with use of the device of magnetic processing of a stream of gas is offered.

Conclusions

Influence of temperature, pressure and speed

of a stream of gas on process of fastening of a particle of different diameter and a magnetic susceptibility on a magnetic surface that is the initial stage of coagulation of particles is established.

Keywords

coagulation, magnetic force, permanent magnet, magnetic susceptibility, associated gas, the force of the flow resistance coefficient of drag, the velocity and pressure of the gas flow

References

1. Shaidakov E.V. *Ochistka poputnogo gaza ot mekhanicheskikh primesey* [Cleaning associated gas from impurities]. Ufa: Monographiya, 2010, 52 p.
2. Shaidakov V.V., Urmancheev S.F., Poletaeva O.Y., Balapanov D.M., Musayev M.V., Shaidakov E.V. *Koagulyatsiya mekhanicheskikh primesey v potoke zhidkosti* [Coagulation of solids in the liquid stream]. Petroleum Engineering, 2009, issue 9, pp. 53–55.
3. Rabinovich E.Z. *Gidravlika* [Hydraulics]. Moscow: Nedra, 1980, 278 p.
4. Rossel J. *Obshchaya fizika* [General Physics]. Moscow: Mir, 1964.
5. Shaidakov V.V., Musayev M.V., Shaidakov E.V., Poletaeva O.U., Chernova K.V., Kanzafarov F.Y., Gamolin O.E., Pedorich V.N., Rudoi V.V. Pat. 71976 of the Russian Federation, the IPC S02F 1/48. *Ustroystvo dlya udaleniya ferromagnitnykh chastits iz potoka zhidkosti ili gaza*. OOO Inzhiniringovaya kompaniya. Incomp-neft' [Device for removing ferromagnetic particles from the fluid stream. Inkomp-neft Engineering Company]. Ltd. Engineering Company. Inkomp-oil, issue 2007146510/22; Reported 12.12.2007; publ. 27.03.2008, issue 9.



**Конференц
НЕФТЬ**

ПРИВЕТСТВУЕМ УЧАСТНИКОВ ВСЕРОССИЙСКОГО СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ФОРУМА

**«Промышленная
химия в России.
Обзор рынка
поверхностно-
активных веществ
и их композиций»**



Партнеры:

г.Казань, 20 мая 2014 года

ЭНЕРГЕТИКА
НЕФТЬ ГАЗ
специализированное издание

FRIL