

Контроль ферропримесей пробными, «экстраполируемыми» операциями магнитофореza

к.т.н. доц. Сандуляк А.А., Полисмакова М.Н., Свистунов Д.И., д.т.н. проф. Сандуляк А.В.,
Ершов Д.В., к.т.н. Ершова В.А., Сандуляк Д.А.

МГТУ «МАМИ»

8(495) 223-05-23, доб. 1261

Ключевые слова: магнитофорез, ферропримеси, магнитные сепараторы, магнитные фильтры.

1. **Метод магнитной локализации феррочастиц жидкости.** В [1] описаны различные варианты метода, основанного на позиционировании магнитных полюсов в непосредственной близости к анализируемой среде¹ (рисунки 1 а, б, в, г). Они обеспечивают магнитное воздействие на феррочастицы для их целенаправленного дрейфа к полюсам, накопления осадка.

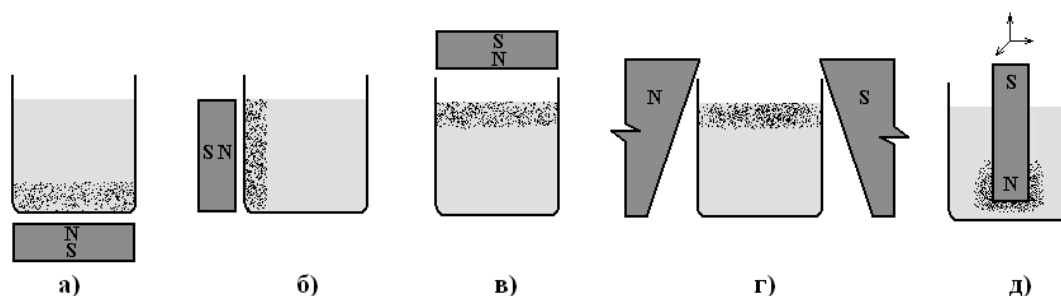


Рисунок 1 - Иллюстрация приемов магнитофореza с локализацией ферропримесей в нижней (а), боковой (б) и верхней (в, г) частях анализируемой пробы жидкости путем ее выдержки: а) над постоянным магнитом, б) рядом с ним, в) под ним, г) в клинообразном зазоре между полюсами магнитной системы, д) при погружении полюсной части магнита в пробу жидкости

В результате такого вида магнитофореza накопление ферропримесей производят на поверхности разграничительной перегородки. Например, это дно или стенка емкости, в которой находится проба анализируемой среды (рисунки 1 а, б). А для как можно более полного исключения нежелательных факторов гравитационной седиментации или «попутного» вовлечения частиц, не склонных к магнитному осаждению, предпринимаются попытки накопления (локализации) ферропримесей в верхней части анализируемой пробы жидкости – на ее поверхности. Этому способствует позиционирование магнита над пробой (рисунок 1 в) или расположение пробы в «опрокинутом» клинообразном зазоре между непараллельными полюсами магнитной (электромагнитной) системы (рисунок 1 г).

При реализации этих приемов магнитофореza (рисунок 1) параметрами измерения являются концентрация железа в исходной пробе и этой же пробе после локализации осадка ферропримесей, а также, что немаловажно, – масса локализованного (для проведения измерений – извлеченного) осадка. При известном объеме используемой для анализа среды (взятой пробы или контрольного потока), эти параметры позволяют судить о содержании ферропримесей, в том числе – и в сравнении с содержанием всех (магнитовосприимчивых и иных) примесей, в состав которых входит железо. Тем самым известной становится также величина фракции ферропримесей в общем балансе примесей, включающих железо.

Однако при реализации различных приемов такого метода, даже при длительном позиционировании магнита или электромагнита, вряд ли можно гарантировать достаточно пол-

¹ Накопление ферропримесей может осуществляться и при погружении полюсной части магнита в пробу жидкости (рисунок 1 д), предварительно изолировав ее съемной, например целлофановой, оболочкой – для последующего беспрепятственного снятия с нее осадка ферропримесей.

ное извлечение ферропримесей из покоящейся (и тем более – движущейся) среды.

2. **Метод неоднократного фильтрационного магнитофореза** (с измерением выходных концентраций). Основан на многократном пропускании пробы анализируемой среды через такую зону захвата ферропримесей, как магнитный фильтр (рисунок 2 а) [1, 2].

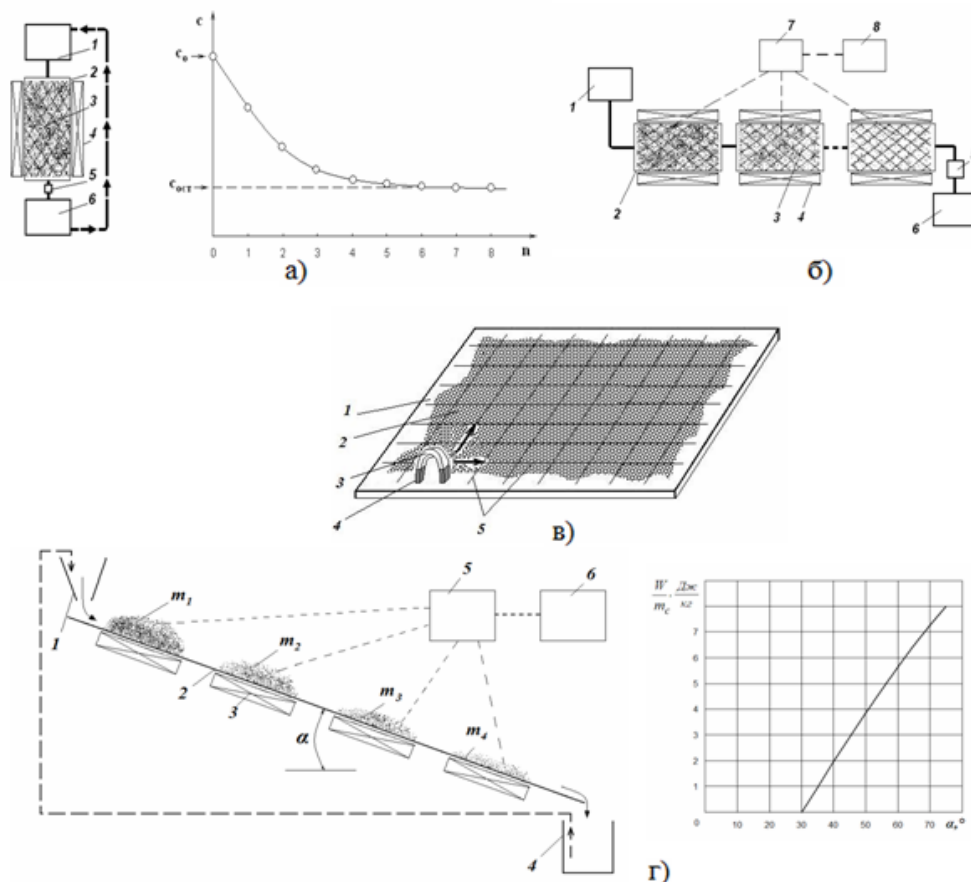


Рисунок 2 - Многократный магнитофорез ферропримесей:

а) с использованием магнитного тест-фильтра (фильтра лабораторной производительности) и иллюстрация характерной кривой убывания измеряемой (до магнитофореза и после каждого цикла) концентрации; 1 – питательная емкость, 2 – корпус фильтра, 3 – намагничиваемая фильтр-матрица, 4 – система намагничивания, 5 – регулятор расхода, 6 – приемная емкость; б) с использованием анализатора в виде «цепочки» магнитных тест-фильтров; 1 – питательная емкость, 2 – корпус фильтра, 3 – намагничиваемая фильтр-матрица, 4 – система намагничивания, 5 – регулятор расхода, 6 – приемная емкость, 7 – устройство для определения операционных масс осадка, 8 – система средств (адаптированная к компьютеру) для визуализации, функциональной легализации, экстраполяции и интеграции операционных масс осадка; в) путем перемещений магнита по ее поверхности; 1 – горизонтальная площадка, 2 – слой анализируемой среды, 3 – магнит, 4 – легкоъемная тонкая оболочка, 5 – схема «продольных» и «поперечных» перемещений магнита; г) в функционально расширенной установке с использованием наклонного, снабженного идентичными магнитными блоками желоба с иллюстрацией стремительного роста удельной кинетической энергии потока сыпучей среды в зависимости от угла наклона желоба; 1 – питательная емкость, 2 – операционный желоб, 3 – магнитный блок, 4 – приемная емкость, 5 – устройство для определения операционных масс осадка, 6 – система средств (адаптированная к компьютеру) для визуализации, функциональной легализации, экстраполяции и интеграции операционных масс осадка

В результате неоднократных операций такого магнитофореза осуществляется пошаговая (от цикла к циклу) принудительная выборка ферропримесей из анализируемой среды. При этом выполняется такое число n циклов, чтобы обеспечивалось практически полное извлечение ферропримесей. Во всяком случае, регистрируя исходное содержание примесей и их содержание после каждого цикла (согласно методу – концентрацию железа c), экспериментатор располагает необходимой для соответствующего анализа зависимостью убывания этого содержания. Так, судя по характеру этой зависимости, прежде всего, по проявлению области автомодельности (c близкой к минимальной остаточной концентрации $c_{ост}$, свидетельствующей о достигнутой степени выборки феррочастиц), он вправе принимать вполне объективное решение о прекращении или дальнейшем продолжении таких циклов.

При этом разница между исходной $c = c_0$ и остаточной $c = c_{ост}$ концентрациями (рисунок 2 а) характеризует концентрацию железа, входящего в магнитовосприимчивую фракцию примесей, а отношение этой разницы к исходной концентрации – фракционную долю магнитовосприимчивых примесей в общем балансе железосодержащих примесей

3. Метод неоднократного магнитофореза (с измерением суммарной массы осадка). Прием неоднократных операций магнитофореза-извлечения ферропримесей давно и широко используется применительно к сыпучим средам [3-5], причем контрольным измеряемым параметром является здесь масса извлеченных (накопленных) ферропримесей m .

В случае ручной реализации этого метода (рисунок 2 в) [4] для максимально возможного извлечения ферропримесей осуществляют ряд однотипных операций извлечения. Каждая из них заключается в совершении множественных (для охвата всего объема анализируемой среды) «продольных» и «поперечных» перемещений магнита по поверхности приготовленного тонкого слоя анализируемой среды (с углублением в этот слой, который после каждой операции, подвергаясь перемешиванию, восстанавливается с сохранением толщины не более 5мм). При этом полюса магнита снабжены легкоъемными оболочками для накопления на них извлекаемых и подвергаемых массовой оценке ферропримесей [4].

А из рекомендуемых для этой цели многочисленных устройств неручного магнитофореза следует выделить те, в которых заложена возможность (к сожалению, не в полной мере реализуемая) неоднократного извлечения ферропримесей [5-8], например, циклического, секционного, ступенчатого, каскадного, в частности, с использованием наклонного желоба.

Данный метод при практикуемом ограниченном (из-за повышенной трудоемкости) числе операций недостаточно точен. Так, даже при осуществлении такого числа n операций, как $n = 3$, рекомендуемого в [4, 5, 7, 8] на основании ничем не обоснованного убеждения о достаточности именно такого числа операций для полной «выборки» ферропримесей, в подвергаемой магнитофорезу пробе анализируемой среды все же остается (а также и при $n > 3$) определенная масса неизвлеченных ферропримесей².

4. Метод неоднократных операций магнитофореза (с функционально экстраполируемой характеристикой пооперационных масс осадка ферропримесей). Обладающий оговоренным выше недостатком метод многократных (но на практике всегда ограниченных по количеству) операций магнитофореза ферропримесей, сопровождающийся пооперационными измерениями массы осадка извлекаемых ферропримесей, тем не менее, можно довести до уровня прецизионного. Исходными данными, разумеется, являются получаемые в рамках ограниченного числа операций (циклов) n экспериментальные данные пооперационных (убывающих) масс m осадка ферропримесей.

При этом решается задача не традиционного определения совокупной массы осадка (в этом случае никак нельзя судить об остаточной массе ферропримесей), а нахождения соот-

² По этой причине соответствующие показатели технологических сред, поступающих в продажу продуктов питания зачастую ошибочны: они намного занижены по сравнению с реальными.

ветствующей закономерности убывания пооперационных масс m осадка ферропримесей в зависимости от числа операций n . В таком случае появляется возможность объективной экстраполяции фактически полученной убывающей зависимости m от n до сколь угодно большого значения n , вплоть до $n \rightarrow \infty$. Другими словами, в этом случае появляется возможность нахождения полной (не ограниченной каким-либо конкретным значением n) зависимости m от n как базовой характеристики, достаточной для наиболее достоверного анализа.

Этому должны способствовать и соответствующие математические приемы, с помощью которых можно было бы находить сумму членов этой дискретной зависимости. Тем самым будет достигнут основной итоговый результат: определение общей массы ферропримесей, находящихся в анализируемой среде, в том числе с учетом остаточной (после фактического выполнения n операций извлечения) массы ферропримесей.

В случае получения этого основного искомого результата доступным становится решение еще одного принципиального (ранее не рассматривавшегося) вопроса. Его суть сводится к возможности количественной оценки погрешности того результата, который получается путем традиционного суммирования масс ферропримесей – лишь по данным ограниченного числа операций (а остаточная масса ферропримесей игнорируется).

Что же касается ключевого оригинального шага в реализации рассматриваемого здесь метода анализа – установления аналитического вида зависимости пооперационной массы осадка ферропримесей m от числа операций n , – то он вполне может быть осуществлен известными приемами функционального тестирования той или иной получаемой эмпирической зависимости. Как правило, тип опытной зависимости m от n – экспоненциальный:

$$m = A \cdot \exp(-k \cdot n) \quad (1)$$

В этом можно убедиться, изображая ту или иную получаемую зависимость m от n в полулוגарифмических координатах, в которых она достаточно хорошо линеаризуется.

Значение входящего в зависимость (1) параметра A определяется просто, а именно графически как фиктивная стартовая ($n = 0$) ордината аппроксимированной в соответствии с (1) зависимости m от n . Значение же параметра k определяется обратным пересчетом на основании этой, уже аппроксимированной зависимости при взятой из нее произвольной паре соответствующих друг другу значений n и $m = m_n$, т.е.

$$k = [-\ln(m_n/A)]/n. \quad (2)$$

Будучи дискретной (справедливой для натурального ряда чисел 1, 2, 3... и т.д.), эта зависимость имеет важную особенность: она представляет собой количественный ряд в виде убывающей геометрической прогрессии. Следовательно, находя первый член (для $n = 1$) этой прогрессии m_1 и ее знаменатель q :

$$m_1 = A \cdot \exp(-k \cdot 1), \quad q = m_n/m_{n-1} = \exp(-k), \quad (3)$$

легко определить массу ферропримесей, находящуюся в анализируемой среде – как суммарную потенциальную массу осадка $m_{1... \infty}$, которая могла бы быть получена при теоретически неограниченном числе операций извлечения ($n \rightarrow \infty$), т.е.

$$m_{1... \infty} = \sum_{n=1}^{\infty} m_n = \frac{m_1}{1-q} = \frac{A}{\exp k - 1}. \quad (4)$$

Полученное же значение $m_{1... \infty}$ при известных значениях объема V и массы M пробы анализируемой среды используется для определения истинных значений объемной c_V и/или массовой c_M концентраций ферропримесей:

$$c_V = m_{1... \infty}/V, \quad c_M = m_{1... \infty}/M. \quad (5)$$

Легко определить также массу извлекаемых из анализируемой среды ферропримесей $m_1...m_n$ при осуществлении ограниченного числа операций n . Для этого следует воспользо-

ваться соответствующей формулой суммы ограниченного числа (n) членов данной прогрессии:

$$m_{1...n} = \sum_{i=1}^n m_i = \frac{m_1 - m_n \cdot q}{1 - q} = A \frac{1 - \exp(-k \cdot n)}{\exp k - 1} \quad (6)$$

Тогда с учетом (4) и (6) относительная погрешность ε такого результата:

$$\varepsilon = (m_{1...n} - m_{1...n}) / m_{1...n} = \exp(-k \cdot n) (\times 100\%). \quad (7)$$

5. Результаты неоднократного, функционально экстраполируемого магнитофореза

Сыпучая среда. Осуществлялись два варианта магнитофореза ферропримесей, подвергаемых массовой оценке. Первый – предусмотренными в [4] ручными перемещениями магнита по поверхности тонкого слоя покоящейся пробы анализируемой среды (рисунок 2 в). Второй – в установке (рисунок 2 г), в которой тонкий слой самой пробы анализируемой среды самотеком перемещался по наклонному неферромагнитному желобу, находящемуся над магнитной системой. При этом магнитофорез в установке сопровождался выполнением ряда сопутствующих функций – в соответствии с описанной выше методологией.

Каждая из операций магнитофореза по первому варианту (рисунок 2 в) – это многочисленные параллельные «продольные» и «поперечные» движения магнита (с углублением в слой пробы анализируемой среды), обеспечивающие «охват» всего объема пробы; для снятия ферропримесей, осаждающихся на поверхности полюсов магнита, они снабжаются легкоъемными оболочками. Каждая из операций магнитофореза по второму варианту (рисунок 2г) – это прохождение слоя анализируемой среды в пределах активного участка (секции) наклонного желоба, т.е. участка, находящегося над одним блоком магнитной системы, под влиянием магнитного поля которого осуществляется выделение из среды ферропримесей, осаждающихся на поверхности этого участка желоба. И, следует отметить особо, здесь требуется, в отличие от аналогов [5, 7, 8], идентичность условий магнитофореза и блоков намагничивания в каждой из операций (секций), иначе нарушается корректность получаемой и используемой для дальнейшего функционального анализа эмпирической части зависимости m от n .

При реализации варианта с использованием наклонного желоба (рисунок 2г) важным является выбор угла α его наклона – такого, при котором выполняются два требования.

Первое требование, призванное обеспечить саму возможность перемещения анализируемой сыпучей среды по наклонному желобу, сводится к следующему. Угол наклона α желоба должен быть не менее некоторого критического угла $\alpha = [\alpha]$, при котором сила скатывания $F_{ск} = mg \cdot \sin \alpha$ соответствует силе трения между анализируемой сыпучей средой и рабочей поверхностью желоба $F_{тр} = k \cdot mg \cdot \cos \alpha$. Здесь m – масса элемента слоя сыпучей среды, k – коэффициент трения покоя, g – ускорение свободного падения.

Значит, в случае равенства этих сил, когда $k = \operatorname{tg}[\alpha]$, выражение для определения критического угла наклона $[\alpha]$ приобретает вид: $[\alpha] = \operatorname{arctg} k$.

И, естественно, если бы коэффициент трения k был доступной табличной величиной, вопрос определения критического угла $[\alpha]$, который, повторим, является минимально возможным для проведения подобного рода измерений (рисунок 2г), решался бы простым расчетом. Однако данные k применительно к случаю трения о поверхность именно сыпучих сред, являясь узко специфичными, в литературе отсутствуют.

Между тем, такие данные легко получить экспериментально в каждом конкретном случае (для любой пары взаимно соприкасающихся тел: «сыпучая среда-поверхность желоба»). Для этого необходимо осуществлять медленное увеличение угла наклона желоба с находящимся на его поверхности слоем сыпучей среды – до такого угла $\alpha = [\alpha]$, при котором сыпучая среда начинает самостоятельное перемещение вниз по поверхности желоба. Зафиксиро-

вав при этом полученное значение $\alpha = [\alpha]$, вычисляется значение коэффициента трения k ; для ряда сыпучих сред, контактирующих с гладкой поверхностью желоба (здесь – листовая нержавеющая сталь 12X18H10T), он составлял от $k = 0,45$ до $k = 0,74$.

Второе требование призвано обеспечить наиболее благоприятный захват ферропримесей – ограничением кинетической энергии потока, конкурирующей с работой магнитных сил по захвату ферропримесей. Поскольку угол наклона α желоба (рисунок 4) – это параметр, влияющий на скорость прохождения анализируемой сыпучей среды (с находящимися в ней ферропримесями) сквозь зону магнитного воздействия, разумеется, здесь следует оценивать кинетическую энергию потока $W = m_c v^2 / 2$ (удобнее – удельную энергию $W/m_c = v^2 / 2$) в

зависимости от угла α . Для нахождения скорости v элемента массой m_c слоя среды можно принять, что при $\alpha > [\alpha]$ этот элемент движется на пути s в течение времени t (от попадания на желоб до местонахождения зоны магнитного воздействия) равноускоренно с ускорением a . Тогда в зоне магнитного воздействия скорость этого элемента среды достигает величины $v = a \cdot t = (2a \cdot s)^{0,5}$, при которой $W/m = a \cdot s$. Ускорение же a обусловлено действием результирующей двух сил: $F_{ск}$ и $F_{мп}$, т.е. $(F_{ск} - F_{мп}) = m \cdot a$, откуда с учетом записанных ранее выражений для $F_{ск}$ и $F_{мп}$: $a = g(\sin \alpha - k \cdot \cos \alpha)$. В итоге выражение для энергии единичной массы слоя в зоне магнитного воздействия записывается как:

$$W/m_c = s \cdot g(\sin \alpha - k \cdot \cos \alpha). \quad (8)$$

Это выражение проиллюстрировано графически на рисунке 2г (при значении коэффициента трения $k = 0,58$, соответствующем критическому углу $[\alpha] \cong 30^\circ$): налицо весьма существенная, значительной частью – почти линейная, зависимость кинетической энергии от угла наклона желоба. Показательно (рисунок 2г), что даже незначительное увеличение этого угла, казалось бы, на небольшую величину (10°) – от $30^\circ - 40^\circ$ до $40^\circ - 50^\circ$, т.е. в среднем в 1,3 раза – влечет весьма существенное увеличение кинетической энергии: в 3 раза. А при большем увеличении этого угла – до $50^\circ - 60^\circ$ и выше – эта энергия возрастает не менее чем в 5 раз.

В связи с этим более чем дискуссионной представляется методика (штатная) получения данных с помощью прибора ПВФ [4, 5], имеющего каскад сильно «наклоненных» желобов, причем без каких-либо рекомендаций для выбора необходимого угла.

Между тем, из выполненного анализа вытекает вполне обоснованный вывод, что при проведении соответствующих исследований с использованием подобных установок (рисунок 2г) следует стремиться к выбору угла наклона, близкого к $[\alpha]$ (лишь немногим больше чем $[\alpha]$). Но при этом, естественно, необходимо исключать возможности «зависания» сыпучей среды (в результате электризации, комкования и пр.). В частности, это можно обеспечить путем принудительной вибрации желоба.

На рисунке 3 приведены многочисленные данные, представляющие собой развернутые характеристики контрольного (лабораторного) магнитофореа ферропримесей различных сыпучих сред, а именно экспериментальные зависимости пооперационной массы m ферропримесей от числа n операций магнитофореа.

Так, на рисунке 3а показана экспериментальная зависимость пооперационной массы m ферропримесей, извлеченных из чайного листа (измельченного сырья), от числа n операций магнитофореа (первый вариант (рисунок 2в)). Видно, что даже после выполненных шести операций магнитофореа анализируемая проба полностью не освобождается от ферропримесей; остаточная масса ферропримесей все еще продолжает оставаться заметной. Для повышения точности результата, как это видно из рисунка 3а, следовало бы увеличить число операций.

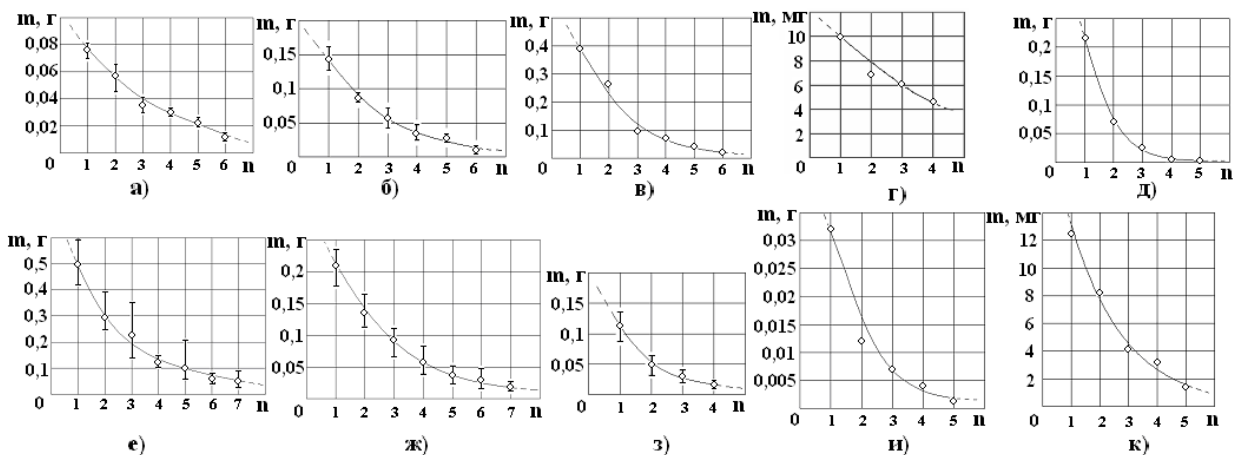


Рисунок 3 - Массы осадка ферропримесей после каждой из операций магнитofореза:
а) измельченного чайного листа (проба № 1), (первый вариант); б) измельченного чайного листа (проба № 2), (второй вариант); в) муки (хлебозавод); г) крупы манной;
д) сахара (завод кондитерских изделий); е) кварцевого песка (образец № 1); ж) кварцевого песка (образец № 2); з) полевого шпата; и) бензина; к) масла.

Но альтернативно такой, кажущейся вынужденной трудоемкой мере, в соответствии с описанной методологией, можно произвести объективную экстраполяцию зависимости m от n , позволяющую выполнить практически точный расчет суммарной массы ферропримесей, включая остаточную массу. Для этого, располагая полученной фактической («укороченной») дискретной зависимостью m от n (рисунок 3а), отражающей здесь результаты шести операций, в соответствии с изложенной выше методологией необходимо подтвердить постулированную ранее закономерность (1), которой должны подчиняться полученные данные.

Одна из попыток установления такой закономерности – графическая иллюстрация этих данных в полулогарифмических координатах (рисунок 4а), удобных с точки зрения тестирования полученной зависимости на ее соответствие экспоненциальной функции.

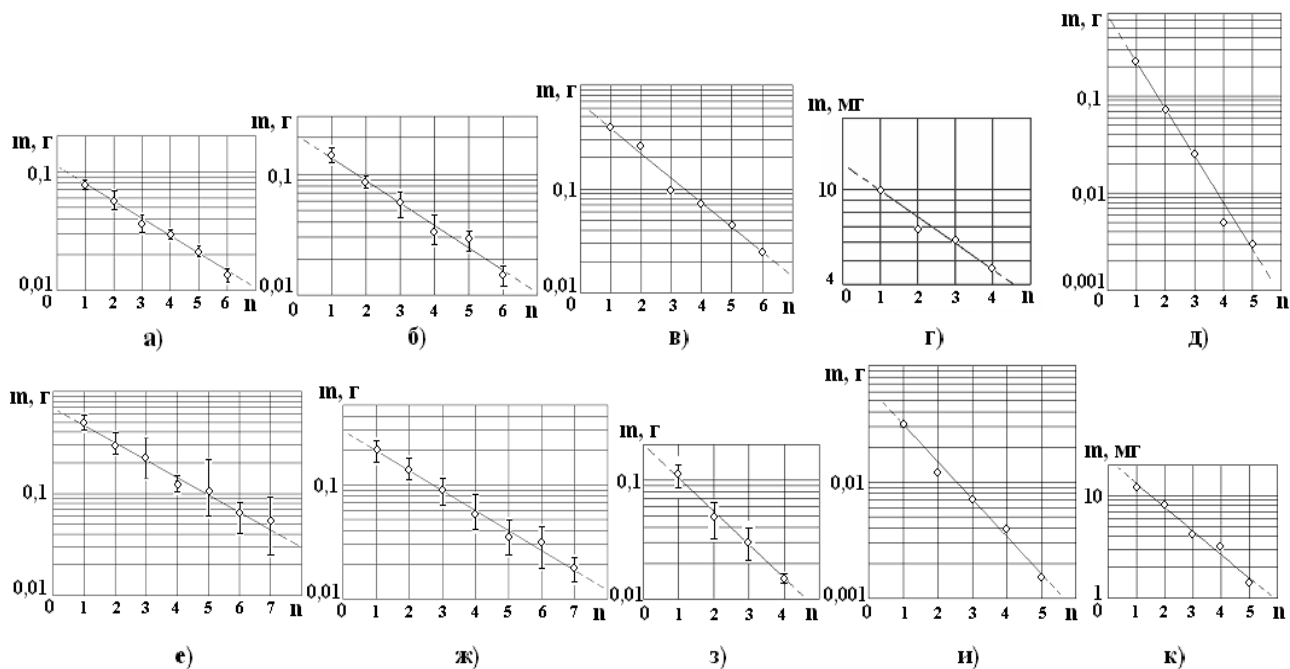


Рисунок 4 - Изображенные в полулогарифмических координатах массы осадка ферропримесей после каждой из операций магнитofореза – согласно рисунку 3

Так, если зависимость m от n поддается линеаризации (а это, как видно из рисунка 4а,

действительно имеет место), то делается принципиальное заключение, что ее функциональный вид экспоненциальный, описываемый выражением (1). В данном частном случае это выражение приобретает вид: $m = A \cdot \exp(-k \cdot n) = 0,11 \cdot \exp(-0,35 \cdot n)$. При этом параметр $A = 0,11$ г, как фиктивная ($n = 0$) начальная ордината, легко определяется графически путем экстраполяции (влево) полученной зависимости m от n до пересечения с осью ординат (рисунок 4а). А параметр k в соответствии с (2) при уже найденном значении A и произвольно взятой из полученной зависимости m от n (рисунки 3а, 4а) пары значений n и m составляет величину $k = 0,35$.

Последовательный же ряд значений m_1 ($n = 1$), m_2 ($n = 2$), m_3 ($n = 3$), m_4 ($n = 4$) и т.д., вытекающих из установленной экспоненциальной дискретной зависимости, как отмечено выше, представляет собой убывающую геометрическую прогрессию. Тогда по формуле (4) можно найти потенциально извлекаемую из анализируемой среды массу ферропримесей $m_{1...∞}$, другими словами – массу ферропримесей, находящуюся в этой среде: $m_{1...∞} = 0,262$ г.

По полученному значению суммарной массы $m_{1...∞}$ в соответствии с (5) определяются значения объемной и/или массовой концентрации ферропримесей в чае: $c_V = 131 \text{ г/м}^3$, $c_M = 0,374 \text{ г/кг}$ (при объеме $V = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ и массе $M = 0,7$ кг пробы).

Используя формулу (6), можно определить массу извлекаемых из анализируемой среды ферропримесей $m_{1...n}$, если расчет производить только по данным, полученным для того или иного числа операций n (в том числе, как прогноз – выходящем при экстраполяции за пределы числа операций-экспериментов). Так, для $n = 10$: $m_{1...10} = 0,255$ г, для $n = 6$: $m_{1...6} = 0,23$ г, а для $n = 3$ – всего лишь $m_{1...3} = 0,17$ г, что существенно меньше истинного значения $m_{1...∞}$.

Оцениваемая по формуле (7) погрешность ε результата анализа, в частности, для числа $n = 10$ операций составляет $\varepsilon = 2,7\%$, т.е. находится в пределах допускаемой величины. Для числа $n = 6$ операций, т.е. для фактически выполненного и, на первый взгляд, достаточного объема опытов (рисунки 3а, 4а) величина получаемой погрешности $\varepsilon = 12,2\%$, тем не менее, является ощутимой. Для числа же $n = 3$ операций получаемая погрешность $\varepsilon = 35,1\%$ намного превышает допускаемую в подобных случаях величину. И, наконец, когда принимается решение ограничиться всего лишь одной операцией магнитного извлечения ферропримесей (на практике, полагаясь на «тщательность» операции, такие случаи, к сожалению, часто имеют место): $\varepsilon = 69,5\%$, что свидетельствует об ошибочности такого решения.

На рисунке 3б показана экспериментальная зависимость пооперационной массы ферропримесей m , извлеченных, как и в предыдущем случае (рисунок 3а), из измельченного чайного листа. Но, в отличие от предыдущего случая, анализируемая среда (в виде тонкого слоя) медленно пропускалась здесь по наклонному желобу (рисунок 2г).

И в этом случае, подобно предыдущему, после выполненных шести операций извлечения анализируемая проба полностью не освобождается от ферропримесей. Вместе с тем, остаточная, все еще остающаяся заметной, масса ферропримесей, как и ранее, поддается количественной оценке. Несмотря на изменившиеся приемы магнитофореза, тем не менее, функциональный вид зависимости m от n – экспоненциальный (рисунок 4) типа (1) с легко определяемыми параметрами A и k : $A = 0,2$ г и $k = 0,41$.

Это обстоятельство позволяет вести дальнейший, уже оговоренный анализ дискретной зависимости (1) – убывающей геометрической прогрессии – с установленными индивидуальными параметрами A и k . Так, масса ферропримесей, находящаяся в анализируемой среде, в соответствии с (4): $m_{1...∞} = 0,394$ г. По данному найденному значению суммарной массы $m_{1...∞}$ объемная и массовая концентрации ферропримесей согласно (5) составляют

$c_V = 197 \text{ г/м}^3$ и $c_M = 0,563 \text{ г/кг}$ (при объеме $V = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ и массе $M = 0,7 \text{ кг}$ пробы).

При этом погрешность ε результата анализа, оцениваемая по формуле (7), в частности, для принятого числа $n = 6$ операций извлечения ферропримесей составляет $\varepsilon = 8,5\%$, а это указывает именно на целесообразность использования изложенной здесь методологии анализа (альтернативно фактическому увеличению числа операций магнитофореza).

Что касается других сыпучих сред (рисунок 3) – муки, манной крупы, сахара, кварцевого песка (двух проб) и полевого шпата – то, прибегая, как и ранее, к приему тестирования получаемых данных в полулогарифмических координатах (рисунок 4), легко подтвердить их экспоненциальный вид (1). Стало быть, предоставляется аналогичная возможность произвести такой же расчет всех необходимых параметров соответствующих базовых характеристик.

Так, для муки (рисунки 3в, 4в): $A = 0,67 \text{ г}$, $k = 0,57$, $m_{1...n} = 0,87 \text{ г}$, $c_V = 2,52 \text{ г/м}^3$ ($V = 0,345 \text{ м}^3$), $c_M = 4,2 \text{ мг/кг}$ ($M = 207 \text{ кг}$), $\varepsilon = 3,3\%$ ($n = 6$). Для манной крупы (рисунки 3г, 4г): $A = 13 \text{ мг}$, $k = 0,26$, $m_{1...n} = 53,3 \text{ мг}$, $c_M = 12 \text{ мг/кг}$ ($M = 3,6 \text{ кг}$), $\varepsilon = 35,3\%$ ($n = 4$). Примечательно, что при проведении рекомендуемых в [5] $n = 3$ таких операций погрешность измерения составит соответственно $\varepsilon = 18,1\%$ и $\varepsilon = 46\%$, т.е. существенно превысит допускаемую величину. Если же в силу субъективных причин оператор ограничится одной операцией, то погрешность возрастет до совершенно неприемлемых величин $\varepsilon = 56,6\%$ и $\varepsilon = 70\%$.

Для сахара (рисунки 3д, 4д): $A = 0,65 \text{ г}$, $k = 1,1$, $m_{1...n} = 0,325 \text{ г}$, $c_V = 5,7 \text{ г/м}^3$ ($V = 0,057 \text{ м}^3$), $c_M = 6,7 \text{ мг/кг}$ ($M = 48,5 \text{ кг}$), $\varepsilon = 0,4\%$ ($n = 5$). Для песка, проба № 1 (рисунки 3е, 4е): $A = 0,7 \text{ г}$, $k = 0,39$, $m_{1...n} = 1,47 \text{ г}$, $c_V = 735 \text{ г/м}^3$ ($V = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$), $c_M = 0,46 \text{ г/кг}$ ($M = 3,2 \text{ кг}$), $\varepsilon = 6,5\%$ ($n = 7$); проба № 2 (рисунки 3ж, 4ж): $A = 0,3 \text{ г}$, $k = 0,4$, $m_{1...n} = 0,61 \text{ г}$, $c_V = 153 \text{ г/м}^3$ ($V = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$), $c_M = 0,095 \text{ г/кг}$ ($M = 6,4 \text{ кг}$), $\varepsilon = 6,1\%$ ($n = 7$). Для полевого шпата (рисунки 3з, 4з): $A = 0,2 \text{ г}$, $k = 0,78$, $m_{1...n} = 0,17 \text{ г}$, $c_V = 187 \text{ г/м}^3$ ($V = 0,91 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$), $c_M = 0,142 \text{ г/кг}$ ($M = 1,2 \text{ кг}$), $\varepsilon = 4,4\%$ ($n = 4$).

Жидкая среда. Магнитофорез подвергаемых массовой оценке ферропримесей бензина и отработанного моторного масла осуществлялся путем пропускания их определенного объема V (160л и 14,5л) через пять последовательно соединенных одинаковых магнитных тест-фильтров (рисунок 2б). При этом каждая из операций магнитофореza заключалась в пропускании среды через один из пяти таких тест-фильтров. В качестве фильтрующей матрицы использовались шары диаметром $d = 4 \text{ мм}$ из нержавеющей ферромагнитной стали 95Х18.

Особое внимание уделялось выбору скорости фильтрования.

Как известно [1, 9], при магнитно-фильтрационной очистке жидкости скоростной режим потока должен выбираться таким, при котором сохраняются благоприятные (докризисные) условия для магнитного захвата феррочастиц. Это значит, что согласно базовому уравнению такой очистки [1, 9] входящий в него показатель α поглощения ферропримесей фильтр-матрицей (или специально вводимый, линейно связанный с α ξ -параметр) функционально должен оставаться зависимым от скорости фильтрования v именно как $\alpha \sim 1/v$ (или $\xi \sim 1/v$). Наглядным же подтверждением этого является зависимость $1/\alpha$ (или $1/\xi$) от v [1,9]: на соответствующем графике такая зависимость – прямая пропорциональная.

На первый взгляд может показаться, что процесс магнитного захвата феррочастиц остается бескризисным исключительно при ламинарном режиме потока в гранулированной матрице, ограничивающемся определенным (критическим) значением числа Рейнольдса, вычисляемым, в частности, как $Re = v \cdot d / \nu$, где ν – кинематическая вязкость потока.

По характеру влияния Re на величину потерь напора Δp в гранулированной матрице ламинарный режим потока, при котором связь между Δp и Re – линейная (т.е. $\Delta p \sim Re$), сохраняется до значения $Re = [Re]_c = 60 \dots 70$ [1, 9], которое для такой матрицы принято считать критическим гидродинамическим числом. Вместе с тем, результаты специальных исследований свидетельствуют [1,9], что благоприятные (докризисные) условия для магнитного захвата ферропримесей, когда процесс все еще идет в соответствии со связью $1/\alpha \sim \nu$ ($1/\xi \sim \nu$), сохраняются и при гораздо более высоком значении Re . Это значение на порядок превышает $[Re]_c$ – вплоть до $Re = [Re]_m = 500 \dots 700$ [1, 9], которое принято считать критическим технологическим числом.

Такое существенное различие в указанных критических числах Рейнольдса – чисто гидродинамическом и технологическом (в магнитно-фильтрационной очистке) – объясняется просто. При $[Re]_c \leq Re \leq [Re]_m$, когда в порах-каналах гранулированной матрицы развивается турбулентный режим течения, в окрестности точек контакта гранул все еще сохраняется ламинарный режим. Следовательно, процесс магнитного захвата действительно продолжает здесь идти в соответствии со связью $1/\alpha \sim \nu$ ($1/\xi \sim \nu$). К тому же, в окрестности точек контакта гранул ответственный за захват и локализацию феррочастиц силовой фактор $H \cdot \nabla H$ (H – напряженность поля) достигает максимальных значений [1].

Таким образом, исходя из предельного технологического значения Re предельная скорость фильтрования должна ограничиваться условием [9]:

$$\nu \leq [\nu] = [Re]_m \cdot \nu / d \cong 600 \nu / d. \quad (9)$$

Для бензина с кинематической вязкостью $\nu \cong 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ($20^\circ - 30^\circ \text{ С}$) эта предельная скорость в фильтр-матрице с диаметром шаров $d = 4 \text{ мм}$ составляет $[\nu] \cong 0,09 \text{ м/с}$.

На рисунках 3и и 3к показаны экспериментальные зависимости пооперационной массы ферропримесей m , извлеченных из бензина (относительно чистого и загрязненного: соответственно нижняя и верхняя кривые) и отработанного моторного масла, от числа n операций магнитного извлечения (соответственно $\nu = 0,07 \text{ м/с} < [\nu]$ и $\nu = 0,043 \text{ м/с}$). Из рисунков 4и и 4к видно, что, несмотря на совершенно иной вид магнитофореза, функциональный вид полученных зависимостей m от n тоже является экспоненциальным. А значит, в этом случае может быть использована та же методология анализа; соответствующий расчет приводит к индивидуальным значениям ключевых параметров. Так, для бензина (нижняя зависимость): $A = 64 \text{ мг}$, $k = 0,74$, $m_{1 \dots \infty} = 58 \text{ мг}$, $C_V = 0,36 \text{ мг/л}$ ($V = 160 \text{ л}$), $C_M = 0,48 \text{ мг/кг}$ ($M = 120 \text{ кг}$), $\varepsilon = 3\%$ ($n = 5$), а для другой пробы бензина (верхняя зависимость): $A = 43 \text{ мг}$, $k = 0,18$, $m_{1 \dots \infty} = 218 \text{ мг}$, $C_V = 1,36 \text{ мг/л}$ ($V = 160 \text{ л}$), $C_M = 1,82 \text{ мг/кг}$ ($M = 120 \text{ кг}$), $\varepsilon = 40,7\%$ ($n = 5$). Для масла: $A = 21 \text{ мг}$, $k = 0,51$, $m_{1 \dots \infty} = 31,6 \text{ мг}$, $C_V = 2,2 \text{ мг/л}$ ($V = 14,5 \text{ л}$), $C_M = 2,6 \text{ мг/кг}$ ($M = 12,3 \text{ кг}$), $\varepsilon = 7,8\%$ ($n = 5$).

Выводы

Основываясь на подтвержденном экспоненциальном убывании пооперационной массы извлекаемых из анализируемой среды ферропримесей, была показана объективная возможность оригинальной неограниченной экстраполяции получаемой убывающей зависимости с гарантированным определением суммарной потенциальной массы (и концентрации) ферропримесей в анализируемой среде, включая их остаточное содержание. Оценена погрешность результата для случаев ограниченного числа операций.

Литература

1. Сандуляк А.В. Магнитно-фильтрационная очистка жидкостей и газов. М.: Химия, 1988.

2. Sandulyak A.V., Garaschenko V.I., Korkhov O.J. Patent 4492921 US, 1985.
3. Зверев С., Крементуло А., Лавринович С. и др. // Хлебопродукты, 2008, № 9, с.58-59.
4. ГОСТ 20239-74, ГОСТ 12573-67, ГОСТ 15113.2-77, ГОСТ 1936-85. Метод определения металломагнитной примеси. Стандартинформ, 2007.
5. Тарутин П.П., Мирон Г.Л., Хаби Г.С. А.с. СССР 300825, 1971.
6. Самбурский А.И., Перминова З.А., Пучкова Н.А. и др. Патент 2197529 RU, 2003.
7. Кармазин В.И., Кармазин В.В., Шанаурин В.Е. и др. А.с. СССР 1319904, 1987.
8. Рожков И.М., Кармазин В.В. А.с. СССР 1461506, 1989.
9. Сандуляк А.А., Ершова В.А., Сандуляк А.В. // Энергосбережение и водоподготовка, 2007, № 5(49), с. 45-48.

Влияние колебаний формы поперечного сечения нежестких деталей типа полый цилиндр на силу резания в процессе комбинированной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием

д.т.н. проф. Максимов Ю.В., к.т.н. доц. Анкин А.В., Ветрова Е.А.
МГТУ «МАМИ»

8(495) 223-05-23, доб. 1353

Ключевые слова: комбинированная обработка, глубина резания, поперечное сечение, нежесткие детали типа полый цилиндр, деформация, колебания, точность обработки.

На основании ряда проведенных исследований [1] было выдвинуто утверждение, что метод комбинированной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием нежестких деталей типа полый цилиндр обеспечивает выигрыш в производительности, высокие показатели точности обработки (8 - 9 квалитет) и хорошую шероховатость обработанной поверхности ($R_a = 0.08...0.32 \text{ мкм}$).

Однако в процессе комбинированной обработки нежестких деталей типа полый цилиндр возникают изгибные (или поперечные) и крутильные колебания.

Изгибные или поперечные колебания в процессе комбинированной обработки возникают из-за наличия геометрических погрешностей в сечении заготовки, которые можно интерпретировать в первом приближении эксцентриситетом сечения. Помимо геометрических погрешностей в сечения заготовки имеющиеся погрешность установки, погрешность статической настройки взаимоположения конструктивных элементов устройства для комбинированной обработки, погрешность статической настройки взаимоположения детали и рабочих элементов устройства, погрешность динамической настройки режущего и деформирующего инструментов и собственно устройства для комбинированной обработки также являются источниками возникновения изгибных колебаний.

Источники возникновения изгибных колебаний можно описать выражением:

$$\Delta = \Delta y + \Delta \sigma_y + \Delta \sigma_o + \Delta \delta. \quad (1)$$

Взаимное расположение векторов указанных погрешностей принимаем таким, чтобы суммарная погрешность (вынуждающая сила) была максимальной.

На основании проведенного анализа регрессионных уравнений вертикальной составляющей силы резания P_z , которая является вынуждающей силой для крутильных колебаний, было выявлено, что наибольший коэффициент в уравнении регрессии стоит при факторе Y_1 , интерпретирующем глубину резания, в то время как частота вращения детали (фактор Y_3) практически не оказывает воздействия на эту составляющую в случае резца с круглой пластиной Ø16,2 мм. Однако на составляющую P_x скорость резания оказывает существенное влияние. Определив закон изменения скорости резания (или частоты вращения детали, опи-