УДК 621.926.5:621.892:66.066.7

Корогодина Евгения Сергеевна, аспирант
(Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург)
Иванов Сергей Леонидович, профессор, д.т.н.
(Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург)
Плащинский Вячеслав Алексеевич, доцент, к.т.н.
(Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург)
Evgeniya S. Korogodina, Postgraduate Student
(Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg)
Sergey L. Ivanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor
(Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg)
Vyacheslav A. Plashchinsky, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
(Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В СМАЗОЧНОМ МАСЛЕ БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ МЕТОДОМ ГРАВИТАЦИОННОГО ОТСТАИВАНИЯ

A STUDY OF THE PROCESS OF DEPOSITION OF METALLIC PARTICLES IN THE LUBRICATING OIL OF DRUM MILLS BY THE METHOD OF GRAVITATIONAL SETTLING

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования процесса осаждения металлических частиц в смазочном масле МС-20 SAE 50 под действием силы тяжести. Получены данные о динамике изменения массы осажденных частиц во времени, построен график усредненных значений.

Abstract. The article presents the results of an experimental study of the process of metallic particles deposition in MS‑20 SAE 50 lubricating oil under the influence of gravity. Data on the dynamics of the deposited particles' mass change over time were obtained, and a graph of the averaged values was constructed.

Ключевые слова: барабанная мельница, смазочное масло, металлические частицы, гравитационное отстаивание, магнитная экстракция, железный порошок, класс чистоты.

Keywords: drum mill, lubricating oil, metallic particles, gravitational settling, magnetic extraction, iron powder, purity class.

Введение. Барабанные мельницы находят широкое применение для измельчения сырья в различных областях промышленности, в том числе в горной, цементной и энергетической отраслях [1]. Одним из важнейших условий надежной и долговечной работы барабанных мельниц является эффективное смазывание их ресурсоопределяющих узлов трения: подшипников, цапф, зубчатых передач. В процессе эксплуатации барабанных мельниц масло циркуляционной системы смазывания неизбежно загрязняется металлическими частицами – продуктами износа трущихся поверхностей, а также частицами измельчаемого материала [2]. Наличие металлических примесей в смазочном масле приводит к ускоренному абразивному изнашиванию, снижению несущей способности масляной пленки и, как следствие, к росту эксплуатационных затрат и внеплановым простоям оборудования [3].

Для восстановления эксплуатационных свойств смазочного масла применяют различные методы его очистки: фильтрацию, центрифугирование, магнитную сепарацию и гравитационное отстаивание [4, 5]. Гравитационное отстаивание является наиболее простым и экономичным методом, однако его эффективность зависит от скорости и полноты осаждения частиц. В свою очередь на скорость и полноту осаждения частиц оказывает влияние размер этих частиц, плотность и вязкость масла [3]. Таким образом, экспериментальное определение этих параметров необходимо для обоснованного выбора режимов очистки смазочного масла.

Целью настоящей работы является экспериментальная оценка времени осаждения металлических частиц под действием силы тяжести при отстаивании масляной смеси на основе моторного масла МС-20 SAE 50.

Материалы и методика эксперимента. Эксперимент проводился трижды на основе масляной смеси, состоящей из моторного масла МС-20 SAE 50 (100 г) и металлических частиц – железного порошка ПЖВ-1 с размером частиц 0–250 мкм (содержание железа 99,8 %) массой 0,16 г. Соотношение масс компонентов было выбрано на основании ГОСТ 17216-2001 «Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей».

Для проведения исследования использовались лабораторные весы ГОСМЕТР ВЛЭ-423С, инвертированный лабораторный микроскоп Leica DM ILM HC, магнитная указка, обеззоленные фильтры «красная лента» и две пластиковые мерные емкости.

Методика проведения экспериментального исследования включала в себя два этапа. На первом этапе определялась масса капли масла, попадающей на фильтр вместе с частицами во время магнитной экстракции при условии, что масса капли масла остается постоянной. Для этого было вы-

полнено 10 замеров следующим образом. Магнитная указка опускалась в мерную емкость с чистым маслом, вынималась из нее, затем ровная торцевая поверхность магнита обтиралась о предварительно взвешенный фильтр, после чего взвешивался фильтр с нанесенной на него каплей масла. Далее вычислялась средняя масса капли масла как среднее арифметическое полученных значений.

По результатам замеров для трех серий эксперимента средняя масса капли масла составила 0,041 г.

На втором этапе в мерную емкость наливалось 100 г масла МС-20, после чего в него добавлялось 0,16 г металлических частиц. Полученная смесь перемешивалась по круговой линии в течение 5 минут. За счет центробежных сил частицы при перемешивании перемещались от центра емкости к ее стенкам (периферии), образуя кольцо. Затем с интервалом 10 минут в течение трех часов выполнялась магнитная экстракция: магнитная указка опускалась до дна емкости, касалась частиц, расположенных по кольцу, извлекалась, и ровная торцевая поверхность магнита обтиралась о предварительно взвешенный сухой фильтр. Фильтр с попавшими на него металлическими частицами и каплей масла также взвешивался. Масса осажденных частиц определялась вычитанием из полученного значения массы сухого фильтра и постоянной массы капли масла.

Результаты и обсуждение. Средние арифметические значения результатов замеров для трех серий эксперимента представлены в таблице 1. Для наглядности отображения результатов приняты следующие обозначения: t – время от начала проведения эксперимента, $m_ф$ – масса сухого фильтра, $m_м$ – масса фильтра с каплей масла, $m_ч$ – масса попавших на фильтр металлических частиц.

Таблица 1 – Результаты замеров массы осажденных металлических частиц

№	t, мин	$m_ф$, г	$m_м$, г	$m_ч$, г
1	0	0	0	0
2	10	0,328	0,372	0,003
3	20	0,312	0,358	0,005
4	30	0,314	0,361	0,006
5	40	0,315	0,362	0,006
6	50	0,328	0,376	0,007
7	60	0,304	0,353	0,008
8	70	0,302	0,351	0,008
9	80	0,3	0,35	0,009
10	90	0,299	0,349	0,009
11	100	0,281	0,33	0,008
12	110	0,278	0,326	0,007
13	120	0,265	0,312	0,006
14	130	0,266	0,312	0,005

15	140	0,332	0,379	0,006
16	150	0,302	0,348	0,005
17	160	0,294	0,341	0,006
18	170	0,302	0,348	0,005
19	180	0,273	0,318	0,004
20	190	0,327	0,371	0,003

Для анализа динамики осаждения на рисунке 1 представлен график зависимости массы осажденных металлических частиц от времени отстаивания.

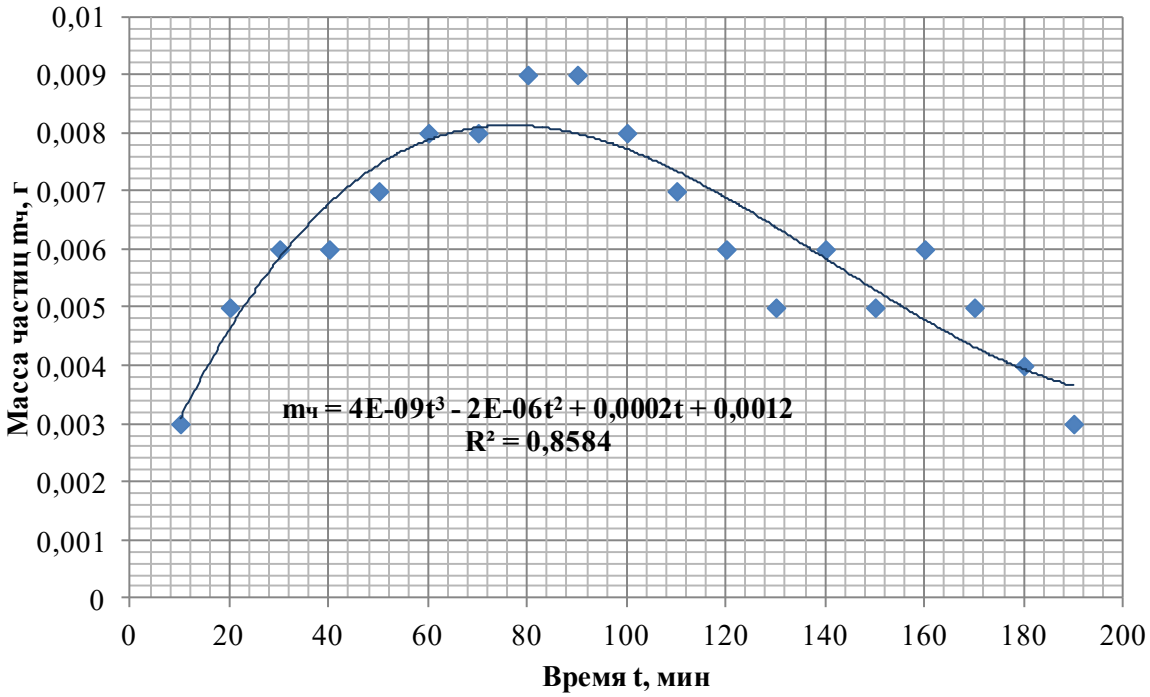

Рисунок 1 – Зависимость массы осажденных металлических частиц от времени отстаивания

Анализ зависимости массы осажденных металлических частиц от времени отстаивания показывает, что наиболее релевантной для описания полученных данных является полиномиальная функция третьей степени. Положительный коэффициент при t^3 в сочетании с отрицательным коэффициентом при t^2 указывает на наличие перегиба кривой: на начальном этапе осаждение интенсифицируется, затем его скорость уменьшается.

На начальном этапе отстаивания наблюдается рост массы частиц, извлекаемых магнитной экстракцией, что объясняется осаждением преимущественно крупных и тяжелых частиц железного порошка. С увеличением времени отстаивания концентрация взвешенных частиц в масле снижается, вследствие чего скорость приращения массы осадка уменьшается. Отрицательный коэффициент при t^2 отражает замедление этого процесса, а поло-

жительный коэффициент при t^3 характеризует изменение кривизны зависимости на исследованном интервале времени.

Значение $R^2 = 0{,}8584$ подтверждает, что кубическая аппроксимация достаточно хорошо описывает экспериментальные данные и может применяться для оценки общей тенденции осаждения. Вместе с тем полученную зависимость не следует использовать для точного количественного прогнозирования массы осадка за пределами экспериментального диапазона времени, поскольку она получена по усредненным данным.

Заключение. Проведенный эксперимент позволил оценить характер осаждения металлических частиц в смазочном масле МС-20 SAE 50 при гравитационном отстаивании.

1. Экспериментально установлено, что процесс гравитационного осаждения металлических частиц железного порошка ПЖВ-1 в смазочном масле МС-20 SAE 50 имеет нелинейный характер и может быть описан полиномиальной зависимостью третьей степени.
2. На начальном этапе отстаивания масса извлекаемых магнитной экстракцией частиц возрастает, что связано с быстрым осаждением более крупных и тяжелых металлических частиц.
3. Коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}8584$ подтверждают адекватность кубической аппроксимации для описания общей тенденции, однако остаточная вариация около 14% может быть связана с неоднородностью распределения частиц в объеме масла, различием фракционного состава порошка, погрешностью определения массы капли масла и непостоянством эффективности магнитной экстракции.
4. Полученные результаты показывают, что гравитационное отстаивание обеспечивает удаление части металлических загрязнений из смазочного масла, однако для более полной очистки масла барабанных мельниц целесообразно сочетать его с магнитной сепарацией или фильтрацией.

Список литературы

1. Богданов В.С. Состояние и направления развития техники и технологии измельчения / В.С. Богданов, С.И. Анциферов, Д.В. Богданов, Е.А. Сычев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 7. – С. 110–116. – DOI 10.34031/2071-7318-2022-7-7-110-116.
2. Субаева А.К. Исследование содержания продуктов износа и металлов присадок в моторных маслах / А.К. Субаева, М.М. Замальдинов, А.А. Глущенко, И.Р. Салахутдинов, И.И. Айнуллин // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2025. – Т. 81, № 4. – С. 45–48.
3. Корогодин А.С. Прогнозирование остаточного ресурса опорных подшипниковых узлов барабанной мельницы для оценки долговечно-

сти работы на основе изменения поля температур / А.С. Корогодин, С.Л. Иванов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 17-1. – С. 186–195. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-17-186-195.

4. Янченко Д.Н. Организация очистки и рационального использования отработавших масел / Д.Н. Янченко // Ларионовские чтения-2025 : Сборник научно-исследовательских работ по итогам научно-практической конференции, Якутск, 10 февраля 2025 года. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2025. – С. 730–733.

5. Бритов С.А. Методы очистки отработанных смазочных масел / С.А. Бритов // Ресурсосберегающие технологии в агропромышленном комплексе России : Материалы IV международной научной конференции, Красноярск, 23–24 ноября 2023 года. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2024. – С. 359–362.