

## Моделирование и исследование электротехнической системы регулируемой сепарации немагнитных материалов с использованием нанодисперсных магнитных жидкостей

Казakov Ю.Б., д-р техн. наук, Страдомский Ю.И., канд. техн. наук, Филиппов В.А., инж.

Выполнено моделирование и исследование электротехнической системы регулируемой сепарации немагнитных материалов с использованием нанодисперсных магнитных жидкостей. Произведен расчет давлений на немагнитное тело в объеме магнитной жидкости энергетическим методом. Рассчитаны силы, действующие на немагнитные тела в магнитной жидкости, находящейся в неоднородном магнитном поле. Результаты расчетов подтверждены экспериментальными исследованиями.

*Ключевые слова:* магнитная жидкость, магнитожидкостный сепаратор, энергетический метод.

## Simulation and research of Electrotechnical System of Adjustable Separation of Non-Magnetic Materials with Using Nano-Dispersed Magnetic Liquids

Yu.B. Kazakov, Doctor of Engineering, Yu.I. Stradomsky, Candidate of Engineering, V.A. Filippov, Engineer

The authors describe the simulation and research of electrotechnical system of adjustable separation of non-magnetic materials with using nano-dispersed magnetic liquids. The calculation of pressure upon non-magnetic body in a magnetic liquid volume is carried out with a power method. The authors calculate forces, operating on non-magnetic bodies in the magnetic liquid which is in a non-uniform magnetic field. The results of calculations are confirmed by experimental researches.

*Keywords:* magnetic liquid, magnetic liquid separator, power method.

Для регулируемого разделения немагнитных материалов по плотности с высокой точностью и производительностью эффективно применение магнитожидкостных сепараторов (МЖС) [1, 2]. Но необходимо исследование влияния различных факторов на процесс сепарации, корректного моделирования регулируемой сепарации до настоящего времени не проводилось.

В рабочем зазоре МЖС (рис. 1) с помощью формы полюсных наконечников формируется неоднородное магнитное поле по высоте зазора в направлении оси  $y$ .

Между полюсными наконечниками помещается магнитная жидкость (МЖ), в которой да-

вление  $p$  распределяется в соответствии с уравнением Бернулли

$$p + \rho g y - u_m = const, \quad (1)$$

где  $u_m = \mu_0 \int_0^H M dH$  – магнитная энергия единицы объема МЖ.

На свободных поверхностях МЖ, проходящих через точки 1 и 2 (рис. 1,а), ввиду большого зазора скачок капиллярного давления отсутствует. Скачок магнитного давления также отсутствует, поскольку эти поверхности практически совпадают с магнитными силовыми линиями и на них нормальная составляющая напряженности  $H$  равна нулю.

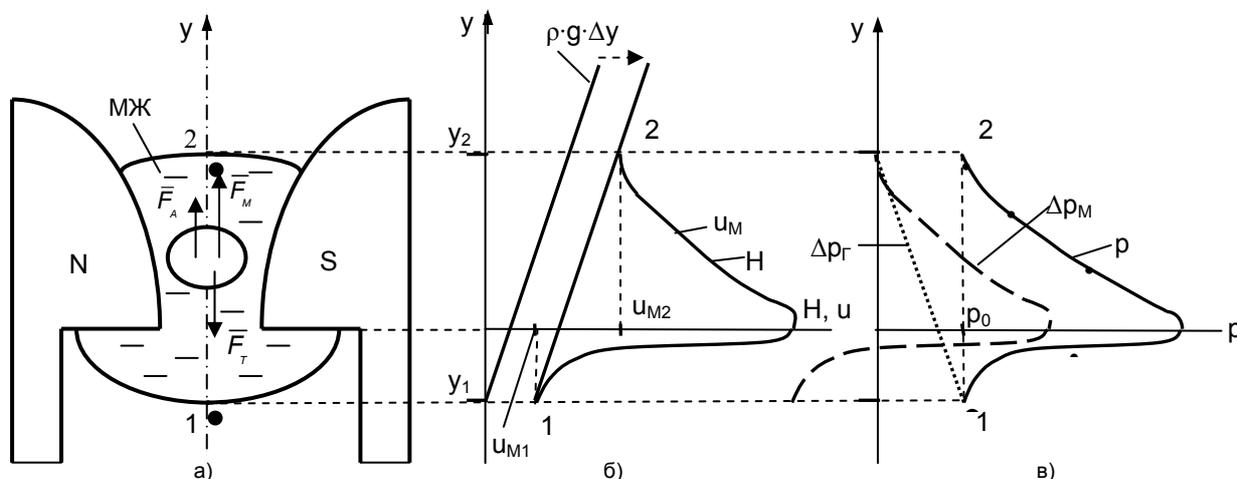


Рис. 1. Рабочий зазор гидростатического магнитожидкостного сепаратора (а) и изменение по высоте МЖ энергий (б) и давления (в)

Давление в МЖ вблизи точек 1 и 2 равно внешнему давлению:

$$p_1 = p_0, \quad p_2 = p_0. \quad (2)$$

С учетом этих граничных условий из уравнения Бернулли (1) получаем соотношение

$$\rho g (y_2 - y_1) = u_{M2} - u_{M1}, \quad (3)$$

которое позволяет определять положение МЖ в рабочем зазоре МЖС. Координаты  $y_1$  и  $y_2$  можно найти, перемещая линейную зависимость

$$\rho g \Delta y = \Delta u_F,$$

характеризующую потенциальную энергию МЖ в гравитационном поле, параллельно самой себе (рис. 1,б) до пересечения с зависимостью  $u_M(y)$  в точках 1 и 2.

На основе выполнения уравнения Бернулли в произвольной точке и в точке 2 имеем

$$p + \rho g y - u_M = p_2 + \rho g y_2 - u_{M2}.$$

Учитывая граничное условие (2) в точке 2, получим выражение, характеризующее изменение давления в МЖ относительно внешнего давления:

$$p = p_0 + \Delta p_g + \Delta p_M, \quad (4)$$

где  $\Delta p_g$  – приращение давления за счет гравитационных сил, действующих на МЖ:

$$\Delta p_g = \rho g (y_2 - y);$$

$\Delta p_M$  – приращение давления за счет магнитных сил, действующих на МЖ:

$$\Delta p_M = u_M - u_{M2}.$$

Со стороны МЖ на погруженное в нее немагнитное тело с внешней поверхностью  $\sigma$  и объемом  $V$  в направлении оси  $y$  действует сила

$$F_y = - \oint_{\sigma} p \bar{e}_y \cdot d\bar{\sigma} = F_{Ay} + F_{My}, \quad (5)$$

где  $F_{Ay} = \rho g V$  – сила Архимеда;  $F_{My} = - \oint_{\sigma} u_M \bar{e}_y \cdot d\bar{\sigma}$

– магнитная сила, которая зависит от распределения удельной магнитной энергии МЖ  $u_M$  на поверхности частицы;  $u_M$  зависит от распределения напряженности  $H$  в объеме МЖ.

Для удельной магнитной силы  $\bar{f}_M$  также справедливо соотношение

$$\bar{f}_M = \mu_0 \cdot M \cdot \nabla H. \quad (6)$$

При использовании (6) имеем

$$F_{My} = \bar{F}_M \cdot \bar{e}_y, \quad \bar{F}_M = \int_V \bar{f}_M \cdot dV. \quad (7)$$

Интегрирование по объему немагнитного тела вектора  $\bar{f}_M$  согласно (7) значительно сложнее, чем интегрирование скалярной функции  $u_M$  по поверхности тела согласно (5). Поэтому энергетический способ моделирования распределения сил и давления в нанодисперсной магнитной жидкости является более эффективным.

Таким образом, возможно регулирование процесса сепарации немагнитных материалов в МЖС за счет изменения градиента магнитного поля в его зазоре, что может быть выполнено,

например, за счет изменения тока возбуждения в намагничивающей катушке.

Для определения сил и давлений проводились численное моделирование магнитных полей методом конечных элементов. После расчета поля применялся экспорт в файл в формате .txt, после чего данные переносились в MS Excel, где рассчитывалось распределение давлений. Для оценки влияния размеров частиц на процесс сепарации выполнены расчеты магнитного поля в сепараторе с МЖ с нелинейной характеристикой намагничивания при наличии немагнитного тела квадратной формы большого и малого объемов.

На рис. 2 представлен результат расчета поля в виде распределения линий потока и напряженности (направление линии анализа напряженности по вертикальной оси по центру зазора) и цветовой закрашки по индукции.

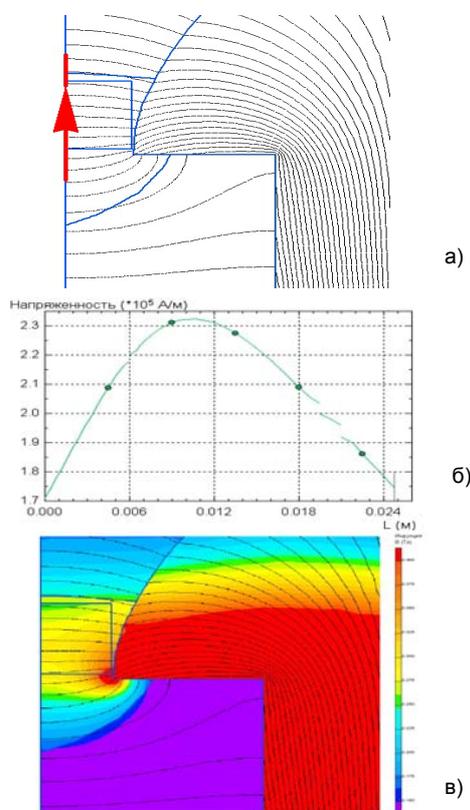


Рис. 2. Результаты расчета поля в зазоре МЖС с немагнитным телом большого объема: а – линии магнитного поля; б – распределение напряженности в зазоре; в – диаграмма распределения индукции

На рис. 3,а представлено рассчитанное распределение давлений вдоль горизонтальной оси зазора на различных высотах зазора МЖС в присутствии немагнитного тела квадратной формы большого объема – по нижней и верхней границам немагнитного тела. Очевидно различие давлений и наличие дополнительной выталкивающей силы, действующей на немагнитное тело.

На рис. 3,б показано соответствующее распределение давлений по нижней и верхней границам присутствующего немагнитного тела квадратной формы небольших размеров. Заме-

тен провал в давлении при окончании немагнитного тела.

Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении заполнения зазора немагнитными частицами, подлежащими сепарации, наблюдается снижение градиента напряженности магнитного поля на 15–25 %, что вызывает снижение дополнительной выталкивающей силы, действующей на немагнитные тела. Соответственно, для поддержания выталкивающей силы на прежнем уровне в целях сохранения требуемой сепарации материалов при возрастании загрузки рабочей зоны сепаратора немагнитными частицами необходимо увеличивать ток в обмотке возбуждения.

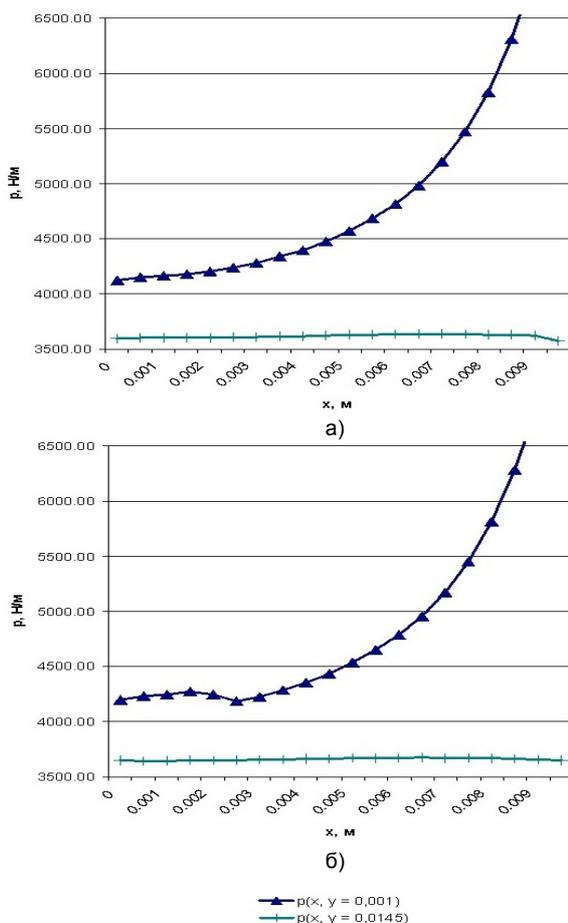


Рис. 3. Распределение давлений на разной высоте в МЖС с квадратным немагнитным телом большого (а) и малого объема (б)

Для опытной проверки результатов моделирования были выполнены экспериментальные исследования на созданной модели сепаратора (рис. 4).

Применялась МЖ на керосине с намагниченностью насыщения  $M_s = 17 \text{ кА/м}$ . В качестве немагнитных частиц использовались свинцовые частицы сферической формы с диаметром  $d$ , изменяющимся в пределах от 2,9 до 17,2 мм. Минимальный зазор между полюсами  $\delta$  устанавливался 19,5 мм.

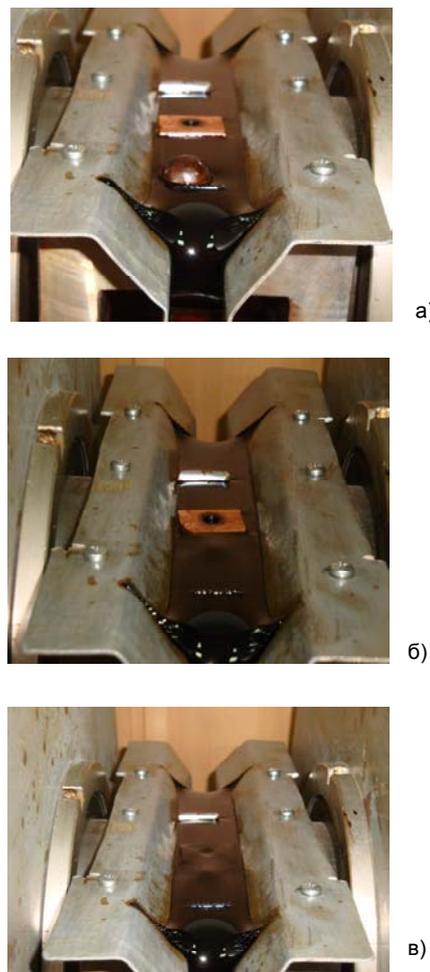


Рис. 4. Фотографии расположения свинцовой, медной и алюминиевой частиц в зазоре сепаратора, выталкиваемых на поверхность магнитной жидкости: а – при  $I = 3 \text{ А}$ ; б – при  $I = 1,6 \text{ А}$ ; в – при  $I = 1,4 \text{ А}$

Начальное значение тока в обмотке 2 А выбиралось из условия гарантированного всплытия свинцовых частиц на поверхность МЖ, при этом индукция в минимальном зазоре была равна 0,6 Тл. Высота столба МЖ составляла 40 мм. На поверхность МЖ помещалась свинцовая частица. Далее при плавном уменьшении тока в катушке возбуждения фиксировались его значения при полном погружении ( $I_{\text{погр}}$ ) и падении ( $I_{\text{пад}}$ ) частицы в МЖ. Значения токов в зависимости от размера частиц приведены на рис. 5. Поскольку на изменение магнитного поля в зазоре влияет не абсолютное значение диаметра немагнитной частицы  $d$ , а та доля, которую занимает частица в зазоре, то на рис. 5 в качестве аргумента взято относительное значение диаметра частицы к минимальному зазору  $d/\delta$ .

В состояниях падения и погружения частицы выполняется второй закон Ньютона – равенство суммы выталкивающих сил (Архимеда и магнитной) и силы тяжести:

$$\rho g V + \mu_0 M \cdot |\nabla H| \cdot V = \rho_c g V. \quad (8)$$

В обоих состояниях сила Архимеда и сила тяжести не изменяются. Поэтому для обоих положений магнитная сила также должна быть неизменной, т.е. должно выполняться равенство мо-

дулей градиента напряженности  $|\nabla H|$ . Согласно экспериментальным и расчетным исследованиям магнитного поля в рабочем зазоре, градиент напряженности в области погружения меньше, чем в области падения частицы при определенном значении тока возбуждения. Для получения равных значений  $|\nabla H|$  ток погружения  $I_{погр}$  должен быть больше тока падения  $I_{пад}$ , что подтверждается экспериментальными данными (рис. 5).

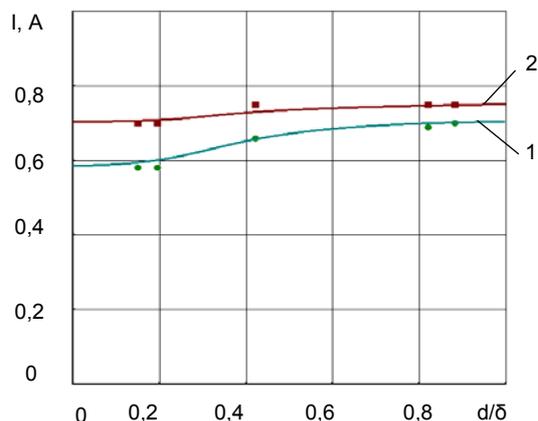


Рис. 5. Зависимость тока от отношения диаметра частиц к минимальному зазору: 1 –  $I_{пад}$ ; 2 –  $I_{погр}$

Графики  $I_{пад}(d)$  и  $I_{погр}(d)$  (рис. 5) подтверждают предполагаемое влияние объема немагнитной частицы на величину выталкивающей магнитной силы  $F_M$ . При заданном токе возбуждения  $I$  с увеличением диаметра немагнитной частицы  $d$  напряженность  $H$  и ее градиент в области расположения частицы уменьшаются, что

вызывает уменьшение  $F_M$ . Для поддержания  $F_M$  на прежнем уровне для сохранения равенства (8) ток возбуждения необходимо увеличивать. В области падения частицы рабочий зазор имеет наименьшее значение и при отсутствии частицы весь заполнен МЖ.

В зоне же погружения значение рабочего зазора больше, и МЖ его заполняет частично.

Увеличение размера немагнитной частицы в области падения в большей мере влияет на уменьшение градиента напряженности поля, что вызывает необходимость в большей мере увеличивать ток возбуждения  $I_{пад}$ , по сравнению с  $I_{погр}$ . Таким образом, на основании численного конечно-элементного моделирования распределения магнитных полей, давлений и сил в магнитожидкостном сепараторе немагнитных материалов с максимально предельным числом конечных элементов, сравнимым с размерами частиц, возможно математическое исследование влияния размеров, формы и плотностей частиц, степени заполнения зазора частицами на процесс их сепарации. Экспериментальные исследования подтвердили с приемлемой точностью результаты численного моделирования.

#### Список литературы

1. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. – М.: Химия, 1989. – 240 с.
2. Гогосов В.В., Смолкин Р.Д. Магнитожидкостные сепараторы // Механизация и автоматизация производства. – 1990. – № 4. – С. 32–33.
3. Казаков Ю.Б., Страдомский Ю.И., Филиппов В.А. Численное моделирование процессов в нанодисперсных магнитных системах // Перспективные материалы. – 2008. – Вып. 6. – Ч. 1. – С. 459–463.

*Казаков Юрий Борисович,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электромеханики,  
телефон (4932) 26-97-06,  
e-mail: elmash@em.ispu.ru

*Страдомский Юрий Иосифович,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики,  
телефон (4932) 26-97-06,  
e-mail: elmash@em.ispu.ru

*Филиппов Василий Александрович,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
инженер кафедры электромеханики,  
телефон (4932) 26-97-06,  
e-mail: elmash@em.ispu.ru