

Д. Ю. Б о р и н, В. П. М и х а й л о в,  
А. М. Б а з и н е н к о в

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТО- РЕОЛОГИЧЕСКОГО ДРОССЕЛЯ МОДУЛЯ ЛИНЕЙНЫХ СВЕРХТОЧНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ**

*Приведена новая нелинейная модель магнитореологического дросселя — основного исполнительного элемента позиционирующих устройств с реологическим управлением. При разработке модели учтены такие явления, как магнитный гистерезис в элементах магнитопровода, размагничивающий фактор, присутствие в конструкции дросселя постоянного магнита, магнитные параметры реологической среды, а также ее нелинейное поведение. Адекватность разработанной модели подтверждена экспериментальными данными.*

Магнитореологические (МР) жидкости представляют собой суспензии микрочастиц магнитных материалов в органических маслах. Под действием магнитного поля частицы, распределенные в объеме дисперсной среды, образуют структуры, ориентированные вдоль силовых линий поля. При этом магнитное взаимодействие между частицами приводит к значительному изменению реологических свойств, поскольку образованные структуры препятствуют свободному перемещению суспензии и вызывают увеличение вязкости жидкости более чем в  $10^5$  раз, что зависит от материала частиц дисперсной фазы, дисперсионной среды, размеров частиц и их объемной концентрации, а также от других параметров [1]. Благодаря этому эффекту МР жидкости получили широкое распространение в полуактивных демпфирующих устройствах, тормозных системах и жидкостных захватах.

Ранее была показана перспектива использования МР жидкостей в качестве рабочей среды для гидравлических механизмов прецизионного позиционирования [5, 6]. Преимущество МР систем заключается в том, что управляющие элементы (заслонки, клапаны и т.п.), характерные для традиционной гидравлики, заменены МР дросселями, которые не имеют подвижных инерционных элементов, повышающих сложность конструкции и уменьшающих надежность и долговечность.

Погрешность позиционирования при использовании МР механизмов не превышает доли микрометров [6] и потенциально может быть снижена до нанометрового уровня. Постоянная времени, определяющая быстрдействие, оценивается на уровне 100...200 мс и определяется в основном временем структурирования и релаксации частиц дисперсной фазы МР жидкости. К недостаткам МР устройств можно

отнести малую статическую жесткость и гистерезис, характерный для любых магнитных систем.

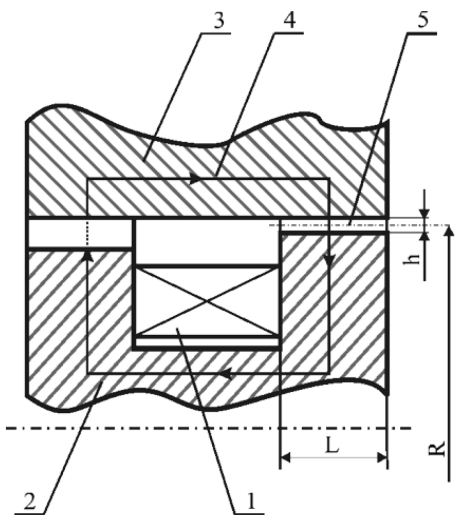
В работах [5, 6] при рассмотрении МР дросселя не учитывались такие факторы, как магнитный гистерезис в элементах магнитопровода, размагничивающий фактор, магнитные параметры МР жидкости, присутствие в конструкции дросселя постоянного магнита, а также нелинейное поведение МР жидкостей при воздействии управляющего сигнала и сдвиговых скоростей.

В настоящей статье предложена новая нелинейная модель МР дросселя, которая необходима для оптимизации конструкции и для улучшения точностных и динамических характеристик МР механизмов точного позиционирования.

**Физические основы работы магнито реологических механизмов.** В общем виде поведение МР жидкостей, как и других реологических сред, характеризуется следующими параметрами:  $\tau$  — касательные напряжение сдвига;  $G$  — модуль сдвига;  $\gamma$  — сдвиговая деформация;  $\dot{\gamma}$  — сдвиговая скорость;  $\tau_y$  — предел текучести, в случае МР жидкости зависящий от приложенного магнитного поля, материала, объемной концентрации частиц дисперсной фазы и температуры;  $\eta$  — коэффициент пластической (сдвиговой) вязкости жидкости, определяемый приложенным магнитным полем и скоростью сдвиговых деформаций. При сдвиговых напряжениях  $\tau$ , меньших предела текучести структурированной среды  $\tau_y$ , смещения слоев жидкости относительно друг друга не происходит, т.е. МР жидкость ведет себя как вязкоупругое тело, при достижении сдвиговых напряжений  $\tau$ , равных пределу текучести  $\tau_y$ , слои жидкости смещаются и МР жидкость начинает течь.

Принцип действия МР механизмов основан на описанном ранее эффекте. Регулируя внешним магнитным полем вязкоупруго-пластичные свойства МР жидкости, используемой в качестве рабочей среды, можно сверхточно управлять определяемым сдвиговыми напряжениями  $\tau$  перепадом давлений в гидравлической системе МР механизма или упругими деформациями структурированной суспензии, вследствие чего осуществляется прецизионное позиционирование.

Рассмотрим главный исполнительный элемент МР механизма — МР дроссель. Схема типового МР дросселя с кольцевым рабочим зазором приведена на рис. 1. Дроссель состоит из электромагнитной катушки 1, сердечника 2 и корпуса 3 из магнитной стали, которые выполняют функции магнитопровода. Ток, протекающий через обмотку катушки, вызывает появление магнитного поля и, соответственно, магнитного потока через магнитопровод. Магнитный поток 4 замыкается через зазор 5 и увеличивает динамический предел текучести МР жидкости, протекающей через зазор.



**Рис. 1.** МР дроссель с кольцевым рабочим зазором:

1 — электромагнитная катушка, 2 — сердечник, 3 — корпус, 4 — магнитный поток, 5 — рабочий зазор

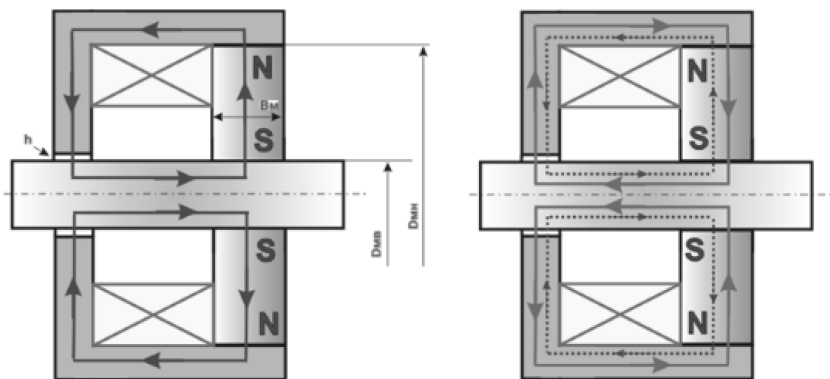
ния механизмов с МР управлением. Регулировка суммарных потерь напора  $\Delta P$  в рабочем зазоре дросселя определяет смещение контролируемого объекта, максимально достижимый перепад давлений, влияет на нагрузочную способность МР механизма.

Если добавить на один из участков магнитопровода МР дросселя постоянный магнит (рис. 2), то можно обеспечить структурирование жидкости в зазоре при отсутствии тока в обмотках катушки. Тогда, при соответствующей схеме подключения катушки, приложением внешнего магнитного поля можно скомпенсировать поле постоянного магнита и в результате — управлять свойствами жидкости, протекающей через зазор дросселя. Подобная конструкция позволяет обеспечить статичес-

Потери напора (перепад давлений)  $\Delta P$  в рабочем зазоре дросселя будут определяться реологическими свойствами среды, находящейся в зазоре, и его геометрическими характеристиками:

$$\Delta P = f(\tau, \tau_y, \eta, L, h). \quad (1)$$

Очевидно, что минимальный перепад давлений  $\Delta P_\tau$ , который необходим для сдвига одного слоя жидкости относительно другого, определяется пределом текучести структурированной среды  $\tau_y$ , зависящим от приложенного магнитного поля, и, как было показано в работах [6, 7], является наиболее значимым параметром, определяющим погрешность позиционирования механизмов с МР управлением.



**Рис. 2.** Схемы МР дросселей с постоянным магнитом и разными схемами подключения катушки

кую жесткость МР устройства, удерживая заданный перепад давлений в зазоре полем постоянного магнита.

При отсутствии расхода жидкости через рабочий зазор дросселя перепад давлений, выдерживаемый структурированной жидкостью в зазоре, будет определяться модулем сдвига  $G'$ , который соответствует составляющей статической жесткости механизма  $k_{ст}$ , обусловленной магнитоуправляемой жидкостью. При наличии в магнитной цепи дросселя постоянного магнита модуль сдвига  $G$  будет определяться создаваемой магнитом индукцией  $B$  в зазоре, заполненном жидкостью.

Быстродействие МР механизмов во многом определяется временем структурирования  $t_c$  частиц в цепочки и кластеры и временем релаксации  $t_p$  напряжений в данных структурах при изменении прикладываемого магнитного поля (управляющего сигнала).

Параметры МР механизма прецизионного позиционирования и влияющие на них параметры магнитоуправляемой среды представлены в таблице.

Таблица

**Параметры МР механизма прецизионного позиционирования и влияющие на них параметры магнитоуправляемой среды**

|                           |                   |                         |
|---------------------------|-------------------|-------------------------|
| Диапазон перемещений      | $\Sigma \Delta P$ | $\eta(H, \dot{\gamma})$ |
| Нагрузочная способность   |                   |                         |
| Точность позиционирования | $\Delta P_\tau$   | $\tau_y(H)$             |
| Быстродействие            | $t_c, t_p$        | $f(H, \dot{\gamma})$    |
| Статическая жесткость     | $k_{ст}$          | $G(H)$                  |

**Реологические процессы в МР дросселе.** В общем виде для любой реологической среды сдвиговая вязкость определяется отношением касательного напряжения к сдвиговой скорости:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}. \quad (2)$$

Для нахождения  $\eta$  требуются независимые измерения  $\tau$  и  $\dot{\gamma}$ . Приведенное отношение переменного и для МР жидкости зависит от напряженности приложенного магнитного поля.

Чтобы учесть упругое состояние МР жидкости, т.е. состояние, когда касательные напряжения не превышают предельное напряжение сдвига (предел текучести)  $\tau_y$ , используют выражение

$$\tau = G\gamma, \quad \dot{\gamma} = 0, \quad \tau < \tau_y. \quad (3)$$

Если считать МР жидкость линейно-вязкопластичной средой, то ее поведение описывается моделью Шведова–Бингхэма, учитывающей совместное влияние вязкости и пластичности на касательные напряжения [1]:

$$\tau = \tau_y(H) + \eta_p \dot{\gamma}, \quad \tau \geq \tau_y, \quad (4)$$

где  $\eta_p$  — показатель консистенции МР жидкости, являющийся аналогом коэффициента пластической вязкости (т.е. вязкости при

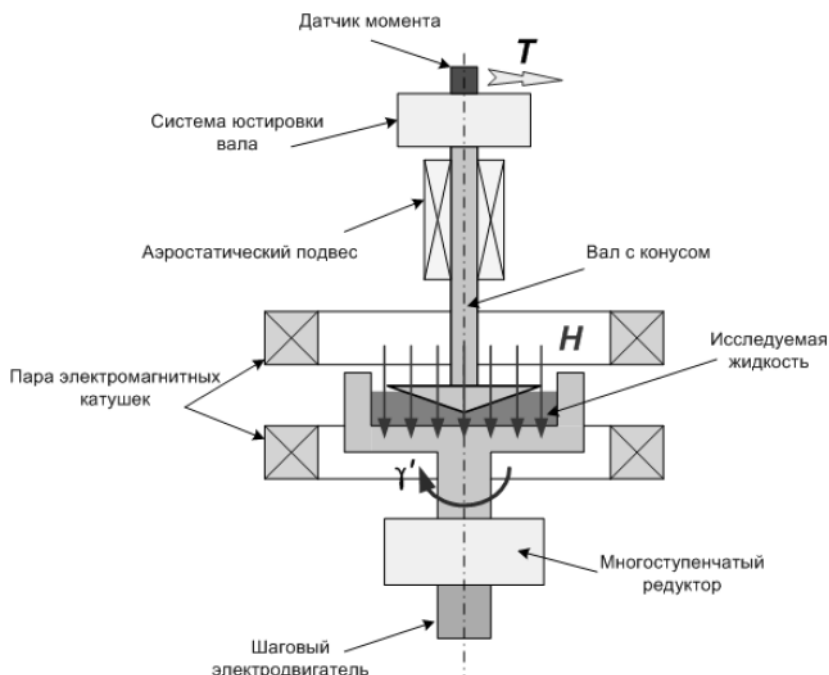
отсутствии магнитного поля). При этом вязкость определяется как

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + \eta_p. \quad (5)$$

Данная модель используется во многих работах по расчету устройств, использующих МР жидкости [5, 8, 9]. Тем не менее, известно [1], что в условиях малых сдвиговых скоростей кривая вязкопластичного течения имеет существенно нелинейный характер. В случае использования МР жидкостей в механизмах перемещений, обладающих нанометровой точностью, сдвиговые скорости могут быть ничтожно малы (до  $10^{-5} \text{ с}^{-1}$ , что соответствует нанометровым перемещениям). Таким образом, в данном случае необходимо рассматривать модели, учитывающие нелинейный фактор. Одним из приемлемых решений является аппроксимация Кассона:

$$\tau^{\frac{1}{2}} = \tau_y^{\frac{1}{2}} + (\eta_p \dot{\gamma})^{\frac{1}{2}}, \quad \tau \geq \tau_y. \quad (6)$$

Для обоснования применимости данной аппроксимации к МР жидкостям был проведен ряд экспериментов с использованием специального реометра [10]. Схема реометра приведена на рис. 3. Исследуемая жидкость находится между конусом и пластиной в зазоре 0,25 мм. Крутящий момент, действующий на жидкость, передается через многоступенчатый планетарно-ременный редуктор, позволяющий получить сдвиговую скорость  $\dot{\gamma}$  в диапазоне  $10^5 \dots 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ . Напряжения,



**Рис. 3. Схема реометра для исследования реологических свойств магнитоуправляемых жидкостей**

возникающие в жидкости, передают крутящий момент на вал с конусом, подвешенный в аэростатическом подшипнике для минимизации механического трения. Момент  $T$ , возникающий на валу с конусом, регистрируется специальным датчиком с разрешающей способностью 0,01 Н·м. Реометр оснащен механической системой юстировки конуса относительно пластины по осям  $X, Y$  с точностью 1 мкм, системой угловой юстировки вала с конусом с точностью 1 мрад и системой юстировки зазора между конусом и пластиной по оси  $Z$  с точностью 50 мкм. Требуемые зависимости получают измерением момента  $T$  на валу с конусом в зависимости от изменения внешнего магнитного поля  $H$ , создаваемого парой электромагнитных катушек, и сдвиговых скоростей  $\dot{\gamma}$ , действующих на исследуемую жидкость.

В результате экспериментов с МР жидкостью, используемой в МР механизмах точных перемещений, выявлена зависимость сдвиговых напряжений в жидкости от действующих сдвиговых скоростей (кривые течения) для различных значений напряженности внешнего магнитного поля  $H$  (рис. 4).

Анализ полученных зависимостей (также называемых кривыми течения) позволяет сделать вывод о справедливости вязко-упругой модели Кассона, т.е. подтверждается предположение, что при соответствующих значениях магнитных полей и сдвиговых скоростей структуры, образованные частицами в жидкости (цепочки и кластеры), не разрушаются и магнитоуправляемая жидкость проявляет значительные упругие свойства.

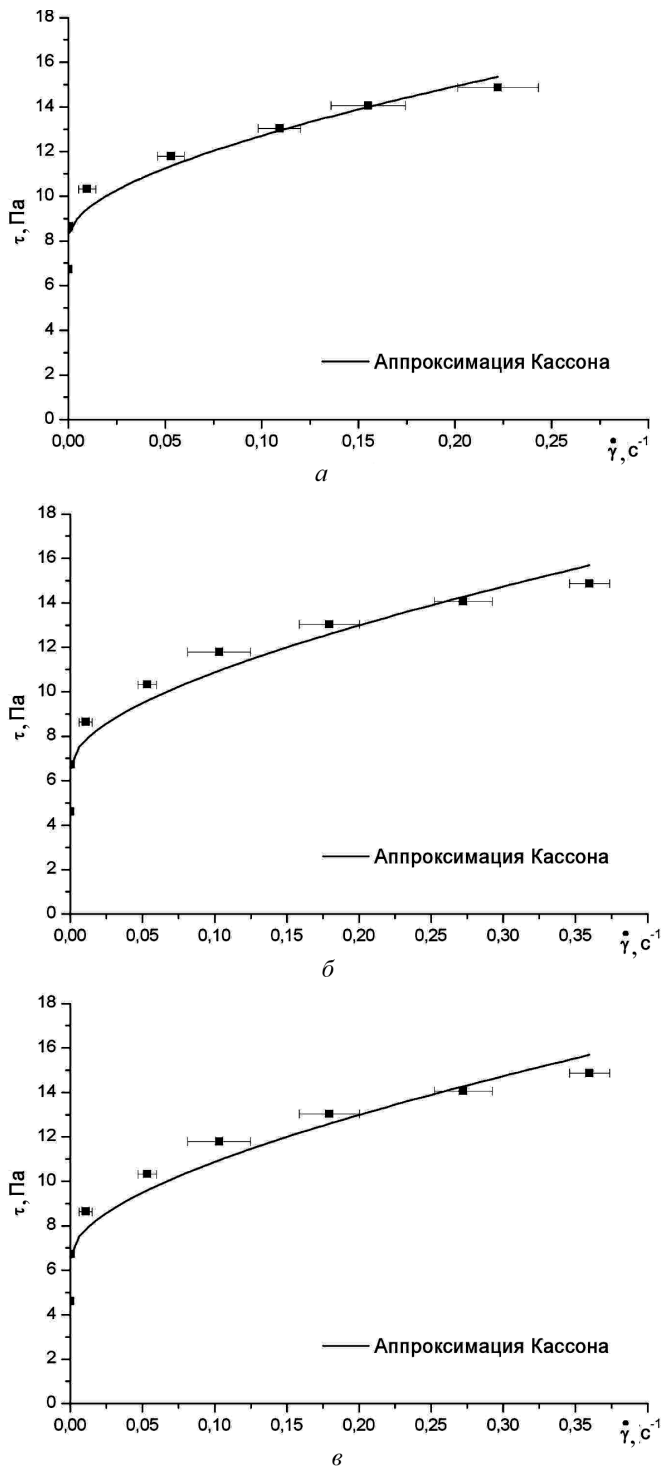
Как было отмечено ранее, точность и диапазон перемещений МР механизма определяются перепадом давлений  $\Delta P$ , создаваемым в рабочем зазоре МР дросселя. Перепад давлений состоит из двух компонентов —  $\Delta P_\eta$  (вязкого компонента, определяемого течением жидкости с вязкостью  $\eta$ ), также называемого ньютоновской составляющей [11], и  $\Delta P_\tau$  (минимального перепада давлений, который необходим для сдвига одного слоя жидкости относительно другого), определяемого пределом текучести структурированной среды  $\tau_y$ :

$$\Delta P = \Delta P_\eta + \Delta P_\tau. \quad (7)$$

При отсутствии магнитного поля течение МР жидкости через кольцевой зазор дросселя описывается формулой Пуазейля для расчета трубопроводов с ламинарным течением [12] и ньютоновская составляющая перепада давления может быть рассчитана как

$$\Delta P_\eta = \frac{12\eta Q_m L}{h^3 2\pi R}, \quad (8)$$

где  $L, h, R$  — геометрические параметры дросселя (см. рис. 1);  $Q_m$  — расход суспензии через дроссель (определяется насосной станцией, подающей МР жидкость).



**Рис. 4.** Кривые течения МР жидкости при напряженности магнитного поля:  $H = 6$  (а), 7 (б) и 8 (в) кА/м

Компонент  $\Delta P_\tau$  представляет собой функцию, зависящую от предела текучести суспензии и геометрических параметров зазора:

$$\Delta P_\tau = f(\tau_y, L, h). \quad (9)$$

В общем виде зависимость (9) для дросселя с кольцевым рабочим зазором, в котором действуют сдвиговые напряжения, можно записать как

$$\Delta P_\tau = \frac{c\tau_y(H)L}{h}, \quad (10)$$

где  $c$  — коэффициент, зависящий от отношения  $\Delta P_\tau/\Delta P_\eta$  (согласно данным работы [9]  $c = 2$  для  $\Delta P_\tau/\Delta P_\eta \ll 1$  и  $c=3$  для  $\Delta P_\tau/\Delta P_\eta > 100$ ).

Для инженерных расчетов при определении предела текучести можно использовать метод, когда экспериментально измеренной зависимости сдвиговых напряжений в МР жидкости от магнитной индукции приложенного поля ставится в соответствие полином, например

$$\tau_y = k_1 B_f + k_2 B_f^2, \quad (11)$$

где  $k_1, k_2$  — постоянные коэффициенты, определяемые графически;  $B_f$  — индукция магнитного поля в МР жидкости.

Результаты экспериментов, проведенных с использованием реометра (см. рис. 3), по определению предела текучести МР жидкости в зависимости от приложенного магнитного поля приведены на рис. 5.

Для полученной зависимости была предложена модель на основе полинома вида

$$\tau_0 = A_0 H + A_1 H^2, \quad (12)$$

где  $A_0 = 0,36021$ ;  $A_1 = 0,11124$  рассчитаны аналитически.

**Магнитная модель МР дросселя.** Дифференциальное уравнение токов и напряжений, действующих в электромагнитной катушке, мож-

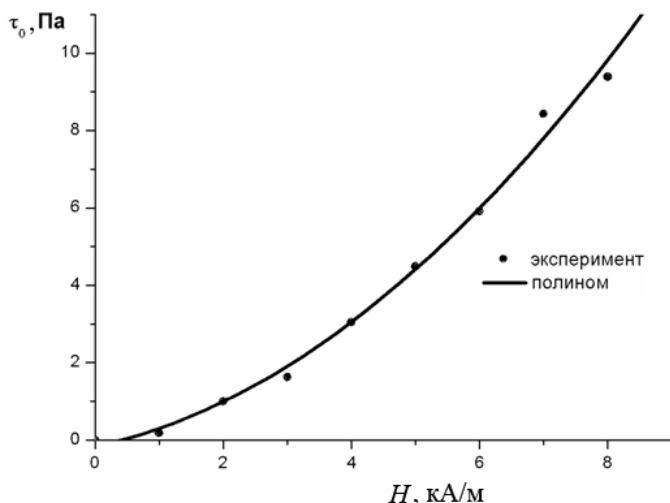


Рис. 5. График зависимости предела текучести МР жидкости от напряженности внешнего магнитного поля



но записать в следующем виде:

$$T_M \frac{dI}{dt} + I = \frac{U}{R}, \quad (13)$$

где  $T_M$  — постоянная времени МР дросселя;  $U$  — напряжение, поступающее на вход катушки;  $I$  — ток в обмотке;  $R$  — сопротивление обмотки.

Напряженность магнитного поля  $H$  внутри катушки определяется числом витков  $N$  и током  $I$  в обмотке:

$$H \sim NI. \quad (14)$$

Магнитная индукция  $B$  в магнитопроводе зависит от магнитной проницаемости  $\mu$  материала сердечника и корпуса дросселя:

$$B = \mu_0 \mu H. \quad (15)$$

Одним из главных отличий в магнитных свойствах МР жидкостей от ферромагнетиков является очень малая петля гистерезиса, либо ее отсутствие на кривых намагничивания МР жидкостей. Элементы магнитопровода МР дросселя сделаны из ферромагнитных материалов. Поэтому явление гистерезиса в МР дросселе определяется остаточной намагниченностью сердечника электромагнитной катушки и корпуса дросселя. Существует много моделей магнитного гистерезиса для ферромагнетиков (Прейзаха, Джилса–Атерона и др.). Для большинства из них необходимы сложные и трудные в понимании интерполяции экспериментальных данных. С другой стороны, существует модель Ходгдона [13], в которой магнитный гистерезис описывается дифференциальным уравнением, учитывающим физическую сущность процессов намагничивания. В работе [14] экспериментально подтверждена достоверность этой модели при расчете магнитного гистерезиса в МР механизме регулирования момента вращения вала. Модель Ходгдона основана на следующем дифференциальном уравнении:

$$\dot{H} = \left| \dot{B} \right| [f(B) - H] + \dot{B}g(B), \quad (16)$$

где  $f(B)$  и  $g(B)$  — функции, зависящие от кривой намагничивания и постоянных коэффициентов, определяемых материалом магнитопровода. Вид функций  $f(B)$  и  $g(B)$  приведен в работе [14].

Решение данного уравнения относительно  $H$ , предложенное автором работы [15], для верхней  $H_U$  и нижней  $H_L$  петель гистерезиса выглядит следующим образом:

$$H_U(B) = \frac{B}{\mu_0 \mu_c} \frac{1}{1 - \left[ \frac{B}{B_s} \right]^b} - H_c; \quad (17)$$

$$H_L(B) = \frac{B}{\mu_0 \mu_c} \frac{1}{1 - \left[ \frac{B}{B_s} \right]^a} + H_c, \quad (18)$$

где  $B_s$  — индукция, соответствующая магнитному насыщению материала магнитопровода;  $H_c$  — коэрцитивная сила;  $\mu_c$  — магнитная проницаемость, соответствующая остаточной намагниченности;  $a$  и  $b$  — подгоночные параметры.

Помимо гистерезиса в расчете напряженности магнитного поля  $H$  необходимо учитывать процесс размагничивания, вызванный собственным размагничивающим полем материала магнитопровода  $H_d$ , направленным в сторону, обратную полю  $H_m$ , создаваемому в магнитопроводе катушкой:

$$H = H_m - H_d. \quad (19)$$

Собственное размагничивающее поле пропорционально намагниченности:

$$H_d = \mu_0^{-1} N_d M, \quad (20)$$

где  $N_d$  — размагничивающий фактор, зависящий в основном от формы тела (определяется эмпирически и приведен для различных материалов и условий измерений в работе [16]);  $M$  — намагниченность.

Значение намагниченности можно найти из уравнения для магнитной индукции поля

$$B = \mu_0 (H + M). \quad (21)$$

Таким образом, следует, что

$$H = H_m - \mu_0^{-2} N_d (B_s - \mu_0 H_m). \quad (22)$$

Магнитная индукция  $B_f$  в рабочем зазоре дросселя определяется исходя из непрерывности магнитного потока

$$\Phi_f = \Phi_i = \text{const} \quad (23)$$

(где  $\Phi_f$  — магнитный поток через рабочий зазор;  $\Phi_i$  — магнитный поток на участке  $i$ ) в виде

$$B_f = \Phi / S_s = B S_f / S_s, \quad (24)$$

где  $S_s$  — площадь поперечного сечения сердечника катушки;  $S_f$  — эффективная площадь сечения рабочего зазора с учетом краевого рассеяния поля.

Для расчета напряженности магнитного поля, действующего на МР жидкость, необходимо знать магнитные параметры МР среды, которые могут быть определены из соответствующей ей кривой намагничивания. Для исследования магнитных характеристик МР жидкости использовался магнитометр VSM 7400 фирмы Lake Shore Cryotronics (США).

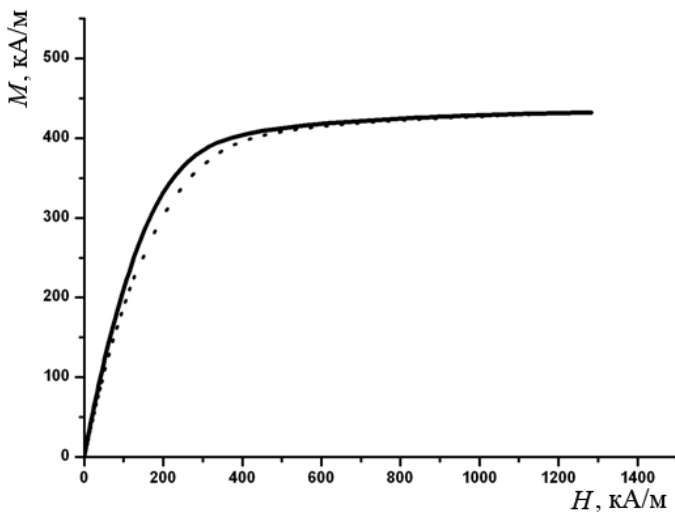


Рис. 6. Кривые намагничивания МР жидкости

На рис. 6 приведены экспериментально полученные начальная кривая намагничивания (штриховая линия) и основная кривая намагничивания (сплошная линия) МР жидкости. Кривые циклического перемагничивания, в том числе и при максимально возможном насыщении ( $\approx 430$  кА/м), совпадают с основной кривой с точностью выше 95%. Экспериментально полученное значение коэрцитивной силы для предельной кривой перемагничивания отличается от нуля не более чем на 0,1%, что позволяет говорить об отсутствии петли гистерезиса при циклическом перемагничивании.

Экспериментально полученная кривая циклического перемагничивания может быть удовлетворительно описана функцией, которую называют функцией Больцмана (пакет программ Microcal Origin):

$$M = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{H-H_0}{dH}}}, \quad (25)$$

где  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $H_0$  и  $dH$  — подгоночные параметры;  $A_1$  — физического смысла не имеет;  $A_2$  — имеет смысл среднеквадратического уровня шума;  $dH$  — диапазон  $H$ , где наблюдается максимальная скорость затухания  $M(H)$ .

Подгоночные параметры для зависимости, приведенной на рис. 6, имеют следующие значения:  $A_1 = -424,54597 \pm 0,69065$ ,  $A_2 = 425,74626 \pm 0,54366$ ,  $H_0 = 0,4652 \pm 0,28017$ ,  $dH = 96,81181 \pm 0,40056$ . Взаимосвязь величин  $B$ ,  $H$  и  $M$  определяется в соответствии с выражением (21).

**Нелинейная модель дросселя и результаты моделирования.** Структурная схема МР дросселя приведена на рис. 7.

Для получения модели дросселя необходимо объединить приведенные ранее уравнения, описывающие его работу, в соответствии со

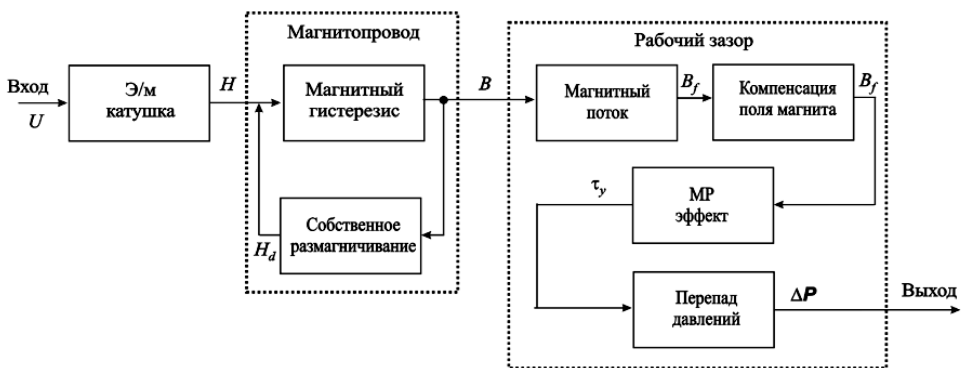


Рис. 7. Структурная схема предлагаемой модели МР дросселя

структурной схемой. Для расчета модели были использованы экспериментальные зависимости  $\tau_y(H)$  и  $B(H)$ .

Расходные характеристики МР дросселя с кольцевым рабочим зазором, полученные в результате моделирования, приведены на рис. 8. В модели были рассмотрены дроссель со следующими конструктивными параметрами:  $h = 0,2$  мм,  $N = 500$ ,  $R = 11$  мм,  $L = 5$  мм, материал магнитопровода — сталь 20, коммерческая МР жидкость производства СКТБ “Полус”.

Смещение при  $I = 0$  от нуля теоретической кривой вызвано наличием остаточной намагниченности в элементах магнитопровода и, как следствие, небольшим МР эффектом в зазоре дросселя.

Результаты расчета модели МР дросселя с плоским рабочим зазором приведены на рис. 9. Параметры дросселя следующие:  $h = 0,75$  мм,  $b = 20$  мм,  $L = 6$  мм,  $N = 500$ , материал магнитопровода сталь 20, некоммерческая МР жидкость.

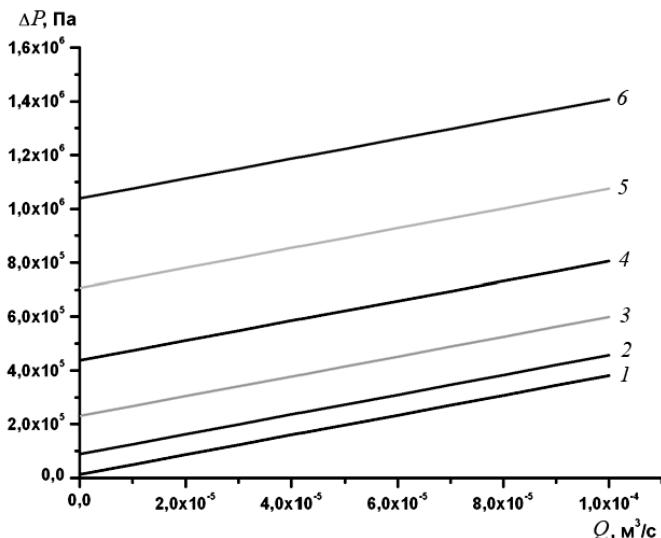
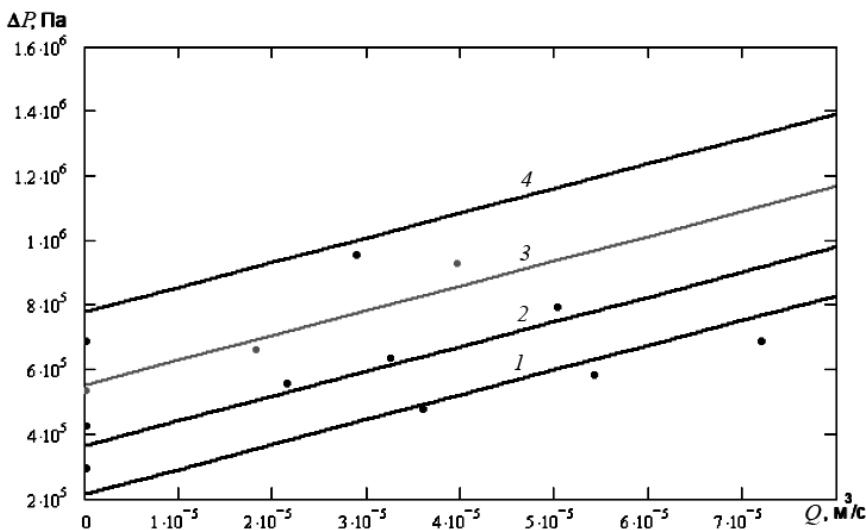


Рис. 8. Результаты моделирования расходных характеристик МР дросселя с кольцевым рабочим зазором:

1; 2; 3; 4; 5 и 6 —  $I = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$  и 1 А



**Рис. 9.** Результаты моделирования и их сравнение с экспериментальными данными: расходные характеристики МР дросселя с кольцевым рабочим зазором: 1; 2; 3 и 4 –  $I = 0,4; 0,6; 0,8$  и 1 А

Для подтверждения адекватности модели на рис. 9 представлены результаты экспериментов, проведенных ранее [6] для некоммерческой МР жидкости. Расхождение экспериментальных и теоретических зависимостей незначительно и не превышает 1 %, что показывает хорошую согласованность экспериментальных данных и расчета по предлагаемой модели.

**Выводы.** Полученная нелинейная модель МР дросселя может быть использована для расчета параметров МР механизмов точного позиционирования, а также для разработки их комплексных динамических моделей. Исходя из результатов моделирования, для заданного значения расхода рабочей среды от насосной станции можно определить суммарный перепад давлений на рабочем зазоре дросселя в зависимости от управляющего сигнала. Предложенная модель подтверждается проведенными ранее экспериментами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шульман З. П., Кордонский В. И. Магнитореологический эффект. – Минск: Наука и техника, 1982. – 184 с.
2. Кордонский W. Elements and devices based on magnetorheological effect // J. Intel. Mat. Syst. and Structures. – 1993, 4(1). – P. 65–69.
3. Jolly M.R., Bender J. W., Carlson D. Properties and Applications of commercial magnetorheological fluids. SPIE 5th Annual Int Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, CA, March 15, 1998.
4. Carlson J. D., Chrzan M. J. Magnetorheological fluid dampers / U.S. Patent 5,277,282 (1994).
5. Анисимов В. В., Деулин Е. А., Михайлов В. П. Прецизионный гидропривод поступательного перемещения с магнитореологическим распределителем // Приборы и техника эксперимента. – 1991. – № 3. – С. 244–245.

6. С в е р х в ы с о к о в а к у у м н ы й м н о г о о к о о р д и н а т н ы й п р и в о д р е о л о г и ч е с к о г о т и п а с т о ч н о с т ь ю п о з и ц и о н и р о в а н и я в н а н о д и а п а з о н е / Е.А. Деулин, В.П. Михайлов, Д.Ю. Борин и др. // Вакуумная наука и техника: Материалы VIII науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов. – М., 2001. – С. 374–379.
7. И с п о л ь з о в а н и е р е о л о г и ч е с к и х п р о ц е с с о в д л я п р е ц и з и о н н о г о п р и в о д а / Е.А. Деулин, В.П. Михайлов, Д.Ю. Борин др. // Сб. докл. IV Междунар. симпози. “Вакуумные технологии и оборудование”. – Харьков, 2001. – С. 163–166.
8. М и х а й л о в В. П., Б о р и н Д. Ю. Управление трением магнитной жидкости в рабочем зазоре многокоординатного вакуумного позиционирующего модуля // Материалы X науч.-техн. конф. с участием зарубежных спец. “Вакуумная наука и техника”. – М.: МГИЭМ, 2003. – С. 309–313.
9. G i n d e r J. M. Behavior of magnetorheological fluids // MRS Bulletin, 23(8). – P. 26–28. 1999.
10. Б о р и н Д. Ю. Исследование магнитных и магнитореологических жидкостей для использования в прецизионных гидравлических механизмах // Отчет по программе Федерального агентства по образованию “Развитие потенциала высшей школы”. – М., 2006.
11. K u z h i r P., B o s s i s G., B a s h t o v o i V. Optimiyation of magnetorheological fluid valves // International Journal of Modern Physics B, Vol. 19, № 7,8,9, 2005, 1229–1235.
12. Б а ш т а Т. М. Машиностроительная гидравлика. – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с.
13. H o d g d o n M. L. Application of a theory of ferro-magnetic // IEEE Trans. Mag., 24(1), 218–221. 1988.
14. J i n u n g A n, D o n g - S o o K w o n . Modeling of a Magnetorheological Actuator Including Magnetic Hysteresis // J. Intel. Mat. Syst. And Structures, 14(9). – P. 541–550. 2003.
15. E s g u e r r a M. Modelling Hysteresis Loops of Soft Ferrite Materials // International Conference on Ferrites ICF8, Kyoto: 2000, 220–222.
16. Г р и г о р ь е в И. Физические величины: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

Статья поступила в редакцию 22.12.2006

Дмитрий Юрьевич Борин родился в 1980 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2003 г. Аспирант кафедры “Электронные технологии в машиностроении” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор пяти научных работ в области магнитореологии и прецизионных вакуумных механизмов.

D.Yu. Borin (b. 1980) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2003. Post-graduate of “Electronic Technologies in Mechanical Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 5 publications in the field of magnetorheology and precise vacuum mechanisms.

Валерий Павлович Михайлов родился в 1961 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1987 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Электронные технологии в машиностроении” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 40 научных работ в области приводов точного позиционирования, магнитоэлектрореологии, автоматизации процессов юстировки и виброизоляции.

V.P. Mikhailov (b. 1961) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1987. D. Sc. (Eng.), professor of “Electronic Technologies in Mechanical Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 40 publications in the field of actuators of precise positioning, magnetorheology, automation of processes of adjustment and vibration proofing.

Алексей Михайлович Базиненков родился в 1983 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2007 г. Автор одной научной работы в области магнитореологии.

A.M. Bazinenkov (b. 1983) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2007. Author of one publications in the field of magnetorheology.