

А.В. РАДИОНОВ, канд. техн. наук
(Україна, Николаев, ООО "НПВП" Феррогидродинамика),

А.С. БОРЦОВ
(Україна, Николаев, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА МАГНИТОЖИДКОСТНОГО ГЕРМЕТИЗАТОРА

Введение

Характерной особенностью работы промышленного оборудования углеобогащительных предприятий является тяжелые условия эксплуатации подшипниковых узлов сепараторов, сушилок, насосов, электродвигателей и т.д., в виду большого количества пыли, влаги, абразива и т.д. Долговечность и надежность работы такого оборудования во многом определяется надежностью уплотнений подшипниковых узлов данного оборудования.

В условиях запыленности, абразива достаточно хорошо себя зарекомендовали магнитожидкостные герметизаторы (МЖГ) [1]. Функции уплотняющего элемента в МЖГ выполняет магнитная жидкость (МЖ), удерживаемая в рабочем зазоре между валом и магнитопроводом МЖГ магнитным полем постоянных магнитов. Величина зазора обычно составляет 0,2-0,25 мм и в основном связана с техническими и технологическими возможностями обеспечения рабочего зазора для данного узла или механизма в целом. При увеличении рабочего зазора будет происходить резкое ослабление магнитного поля и, как следствие, ухудшение уплотняющих свойств МЖГ.

Характерной особенностью углеобогащительного оборудования является увеличение рабочего зазора до 0,3-0,7 мм и даже до 1 мм.

Для понимания поведения МЖ в рабочем зазоре МЖГ необходимо учитывать и высокие линейные скорости (большие диаметры и обороты), и влияние центробежных сил, и возможное ослабление магнитного поля, и неравномерность течения в зазоре, вызванную радиальным биением вала, а также другие факторы.

Особенно важно знать распределение магнитного поля в рабочем зазоре, т.к. все основные характеристики МЖГ определяются параметрами магнитного поля. Ввиду малой величины рабочего зазора измерить распределение магнитной индукции фактически невозможно, т.к. датчик Холла имеет больший размер, чем зазор в МЖГ. Единственной возможностью замерить индукцию в зазоре – применение датчиков Холла из нитевидных кристаллов антимоноида индия [2], их толщина составляет 0,02-0,05 мм. Однако с их помощью тоже сложно добиться полной картины распределения магнитного поля, а с учетом того, что в рабочей зоне МЖГ магнитное поле является резко неоднородным, то фактически невозможно. Аналитические методы также не решают проблему ввиду сложной геометрии в зазоре из-за наличия концентраторов магнитного потока, нелинейных

Загальні питання технології збагачення

характеристик постоянных магнитов, магнитопроводов и МЖ. Для расчета и анализа поля использовались методы, основанные на ряде допущений, соответственно дающие результаты с высокой погрешностью. Даже использование численных методов расчета не давало существенных результатов ввиду большой сложности расчетов [3]. И только в последние годы уровень развития вычислительной техники позволил решать такие задачи. Однако их анализ показал, что исследования проводились в области небольших зазоров (до 0,1 мм) и небольших диаметрах валов (до 50 мм) [4-6]. Для высокоскоростных МЖГ с увеличенными зазорами данные по распределению магнитного поля отсутствуют.

Цель работы

Целью данной работы является компьютерное моделирование взаимосвязанных нелинейных магнитных и гидродинамических процессов в активной зоне МЖГ численным методом конечных элементов с помощью пакета программ Comsol [7] при варьировании величины зазора в диапазоне от 0,1 до 1,0 мм как основа для выработки рекомендаций по усовершенствованию конструкции герметизатора. Расчет выполняется в два этапа. На первом этапе рассчитывается распределение в статике магнитного поля в активной зоне герметизатора с учетом нелинейных характеристик магнитопровода и в предположении насыщения магнитной жидкости $M = M_s$. При этом определяемое положение границы МЖ в статике, ограниченное изобарами $p = M_s \cdot B = \text{const}$, где $B = |B|$ – модуль вектора магнитной индукции. Затем на втором этапе рассчитываются гидродинамические процессы в МЖ для случая вращающегося вала в предположении, что границы этой жидкости совпадают с границами жидкости в статике. При этом учитывается нелинейная эмпирическая зависимость вязкости МЖ от величины магнитного поля и нелинейные свойства уравнения Навье-Стокса. Таким образом две указанные задачи рассматриваются как слабо связанные (по классификации [8]), что позволяет выполнять их последовательное решение.

Численный расчет магнитного поля в зазоре МЖГ в статике

Расчетная схема МЖГ показана на рис. 1.

Исследуемый МЖГ характеризуется осевой симметрией, отсюда полевая задача может решаться в двумерной постановке в цилиндрической системе координат в плоскости rOz . Расчетная область для анализа магнитного поля приведена на рис. 1 б и содержит области с магнитными материалами трех типов: постоянные магниты, намагниченные в осевом направлении 1, ферромагнитный материал полюсов магнитной системы 2 и вращающегося вала 3, а также область, занятая ферромагнитной жидкостью

Полевая задача рассматривается как магнитостатическая и решается в осесимметричной постановке в цилиндрической системе координат в плоскости rOz для векторного магнитного потенциала \mathbf{A} , имеющего единственную φ – компоненту, т.е. $\mathbf{A} = (0, A_\varphi, 0)$.

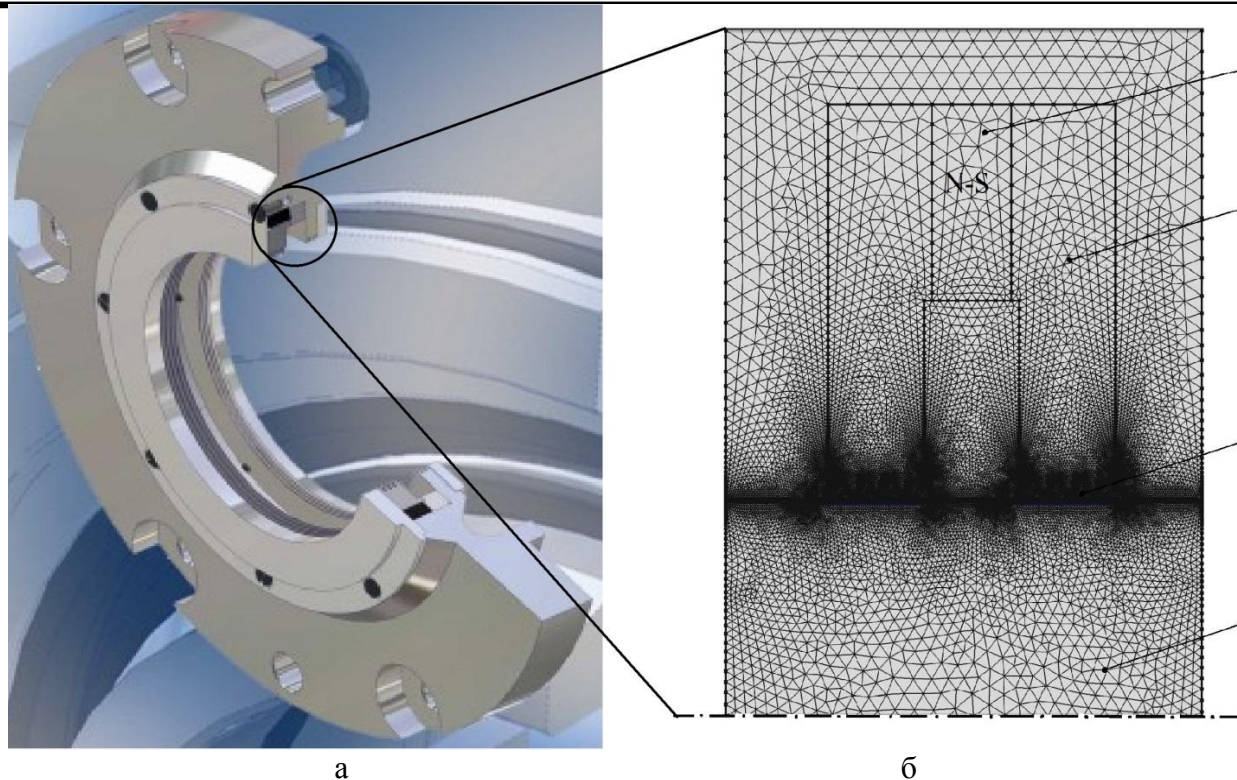


Рис. 1. Общий вид типовой конструкции МЖГ(а) расчетная область ее активной зоны с нанесенной конечно-элементной сеткой (б)

Из системы дифференциальных уравнений Максвелла для стационарного магнитного поля

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0, \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad \nabla \cdot \mathbf{A} = 0, \quad (1)$$

и уравнения состояния магнитного материала, записанного в общем случае как

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r, \quad (2)$$

получим следующее дифференциальное уравнение для векторного потенциала

$$\nabla \times [(\mu_0 \mu_r)^{-1} \nabla \times \mathbf{A} - (\mu_0 \mu_r)^{-1} \mathbf{B}_r] = 0. \quad (3)$$

Здесь \mathbf{H} – напряженность магнитного поля; \mathbf{B} – магнитная индукция; \mathbf{B}_r – остаточная индукция, характеризующая постоянный магнит и задаваемая в области, занимаемой этим магнитом; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; $\mu_r(|\mathbf{B}|)$ – относительное значение магнитной проницаемости (скалярная величина) для магнитного материала, зависящее от модуля вектора магнитной индукции.

Постоянный магнит МЖГ выполнен из материала NdFeB марки 38SH, характеризующегося остаточной индукцией $B_r = 1,26$ Тл и коэрцитивной силой $H_s = 950$ кА/м. Отсюда для уравнения состояния магнита из выражения (2) по-

Загальні питання технології збагачення

сле подстановки этих значений получим для области постоянного магнита $\mu_r = 1,06$.

Магнитные характеристики магнитной жидкости, а также материала полюсов и вала (Ст. 3) подробно описаны в [9].

В качестве граничных условий использовались – условие симметрии на оси вращения вала и условие магнитной изоляции – $V \cdot n = 0$ на боковых и верхней поверхностях. Для численного решения дифференциального уравнения в частных производных (3) с указанными граничными условиями использовался метод конечных элементов, реализованный в пакете программ Comsol [7].

Распределение силовых линий магнитного поля (изолинии $A_\phi r$), и магнитной индукции (в цвете и стрелками) в магнитной системе МЖГ показаны на рис. 2.

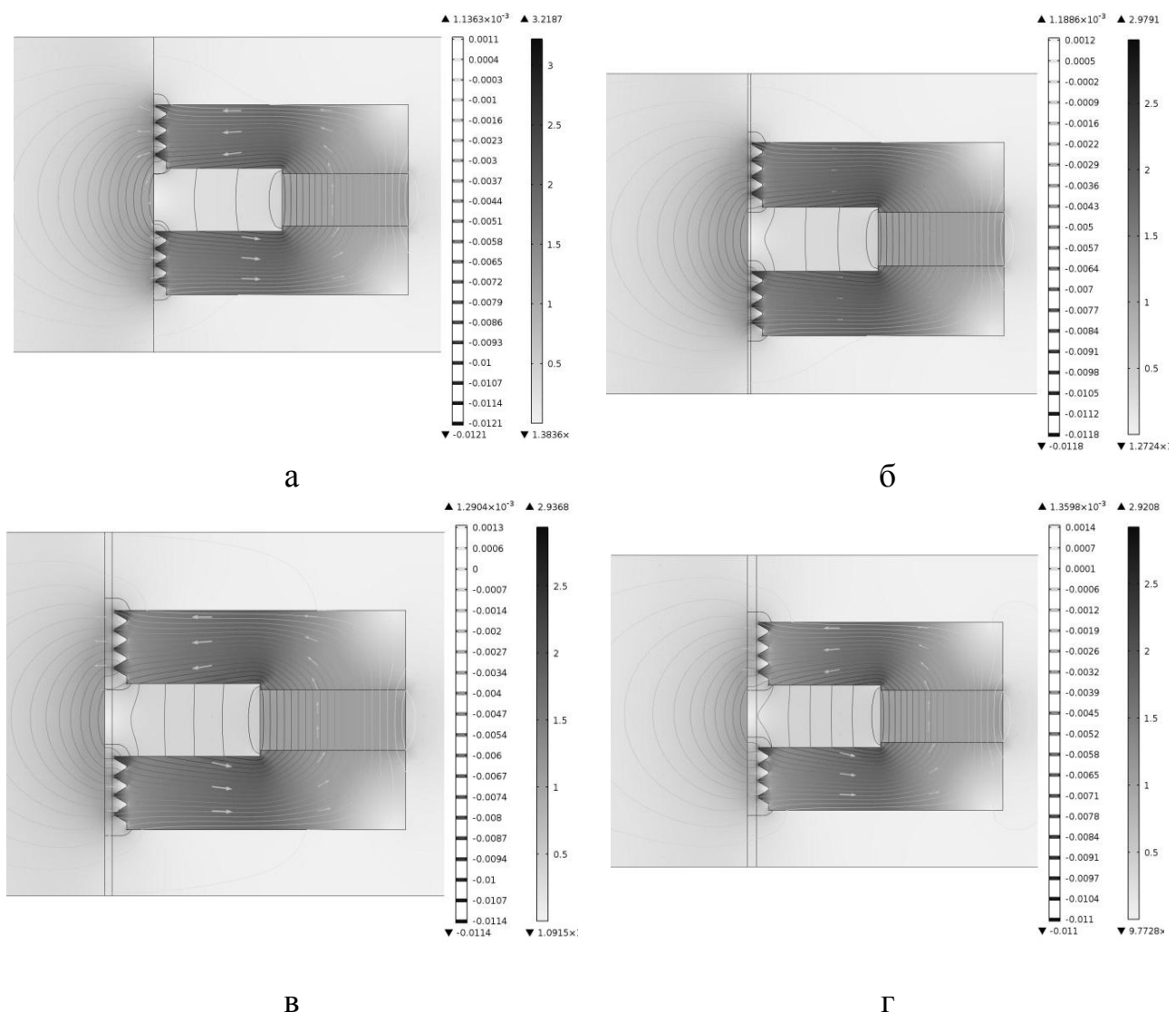


Рис. 2. Распределение в активной зоне МЖГ силовых линий (изолинии A_ϕ), вектора магнитной индукции:
а – зазор 0,1 мм; б – 0,4 мм; в – 0,7 мм; г – 1 мм

На рис. 3 показано распределение радиальной компоненты магнитной ин-
Збагачення корисних копалин, 2013. – Вип. 52(93)

дукции на поверхности вала также соответственно для четырех величин зазоров.

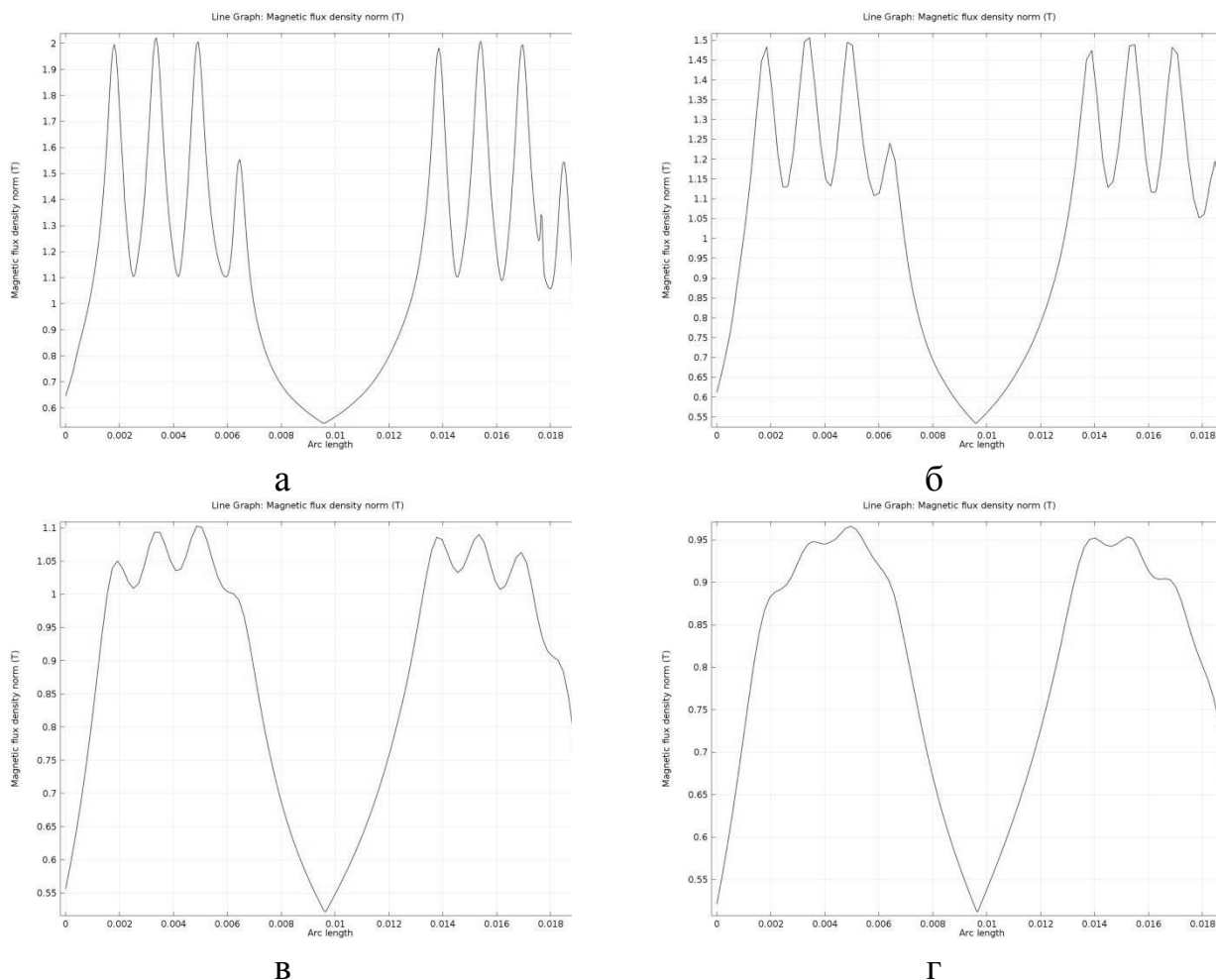


Рис. 3. Распределение радиальной компоненты магнитной индукции на поверхности вала:
а – зазор 0,1 мм; б – 0,4 мм; в – 0,7 мм; г – 1 мм

В первую очередь необходимо отметить прогнозируемое снижение индукции. Это видно из рис. 4.

Интересным является факт, что при $\delta > 1,0$ мы уже не можем говорить о резко неоднородном поле, которого достигали наличием концентраторов магнитного потока. На рис. 3 ясно видно отсутствие пиковых зон, что в целом свидетельствует о недостаточности магнитного поля для удержания жидкости в зазоре. Однако данный вывод можно сделать только после анализа динамики процессов, происходящих в зазоре МЖГ.

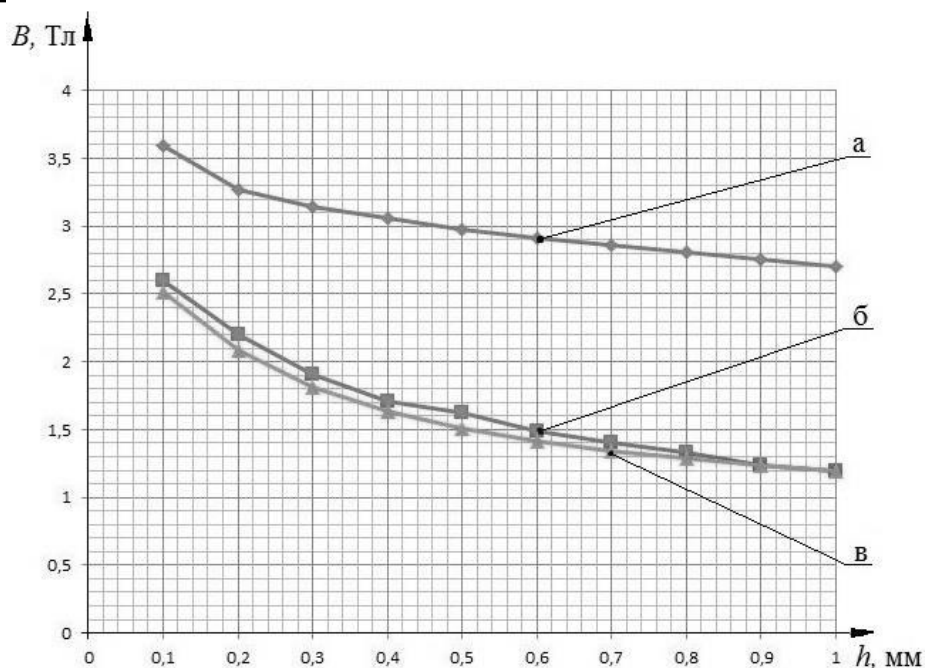


Рис. 4. Розподілення індукції магнітного поля від зуба до валу в зазорі:
 а – індукція магнітного поля; б – індукція магнітного поля в середині зазора; в – індукція магнітного поля около поверхні валу

Далее чтобы перейти ко второму этапу расчета нам необходимо определить свободную поверхность магнитной жидкости, находящейся в зазоре МЖГ в статическом состоянии для различных величин зазора. Этот вопрос был подробно рассмотрен в [10].

На рис. 5 показана расчетная область занимаемая жидкостью в статике при отсутствии осевого перепада давления для величины зазора 0,2 мм. Конфигурация магнитной жидкости ограничивается изолиниями значения магнитного поля \mathbf{B} (либо совпадающих с ними изобар $M_s \cdot \mathbf{B}$). В случае малого объема (рис. 5а) область с жидкостью будет ограничиваться изолиниями большого значения поля (1,8 Тл) и будет локализована в зазоре непосредственно под двумя внутренними зубцами. По мере увеличения объема жидкости эта область будет увеличиваться, занимая весь зазор. Это случай соответствующего $\mathbf{B} = 0,8$ Тл (рис. 5е.) Так как при эксплуатации МЖГ зазор всегда заполнен МЖ, то рассматриваем в дальнейшем вариант, показанный на рис. 5е.

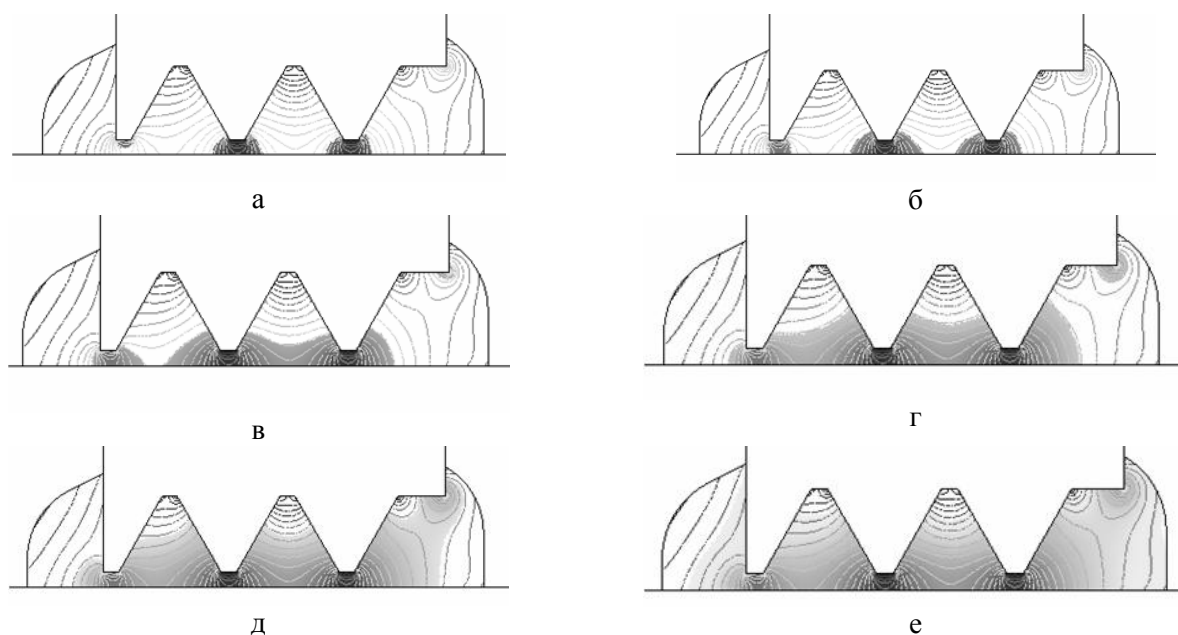


Рис. 5. Различный объем, занимаемый магнитной жидкостью под одним полюсом при осевом перепаде давления $\Delta p = 0$, ограниченный изолиниями магнитной индукции: $B = 1,8$ Тл (а); $1,6$ Тл (б); $1,4$ Тл (в); $1,2$ Тл (г); $1,0$ Тл (д) $0,8$ Тл (е)

Численный расчет течения магнитной жидкости при вращении вала

При решении гидродинамической задачи течения магнитной жидкости в зазоре МЖГ будем использовать следующие допущения:

- положение свободной границы МЖ в динамике при вращении вала совпадают с границами в статике;
- распределения магнитного поля в зазоре МЖГ при данном положении границы МЖ совпадают с распределением поля на рис. 2.

Далее расчет выполняется согласно методике, подробно изложенной в [10]. Отличием являлось то, что в данной работе была учтена зависимость вязкости магнитной жидкости от величины магнитного поля. Для этого в модель была введена эмпирическая формула, предложенная в [11].

$$\eta(B) = \eta_{(B=0)} \cdot (1 + \sqrt{7 \cdot B}), \quad (4)$$

где B задается в Тл.

На рис. 6 показаны вихревые структуры, возникающие в магнитной жидкости и образованные радиальной и азимутальной компонентами скорости. Как видно из рис. 6, структура с наибольшей вихревой скоростью возникает в крайней правой области, что обусловлено наличием больших по размерам свободной границы жидкости. В других пазовых областях также возникают вихревые структуры, однако, максимальное значение скорости в них в разы меньше, что обусловлено интенсивным торможением жидкости о близлежащие стенки магнитопровода.

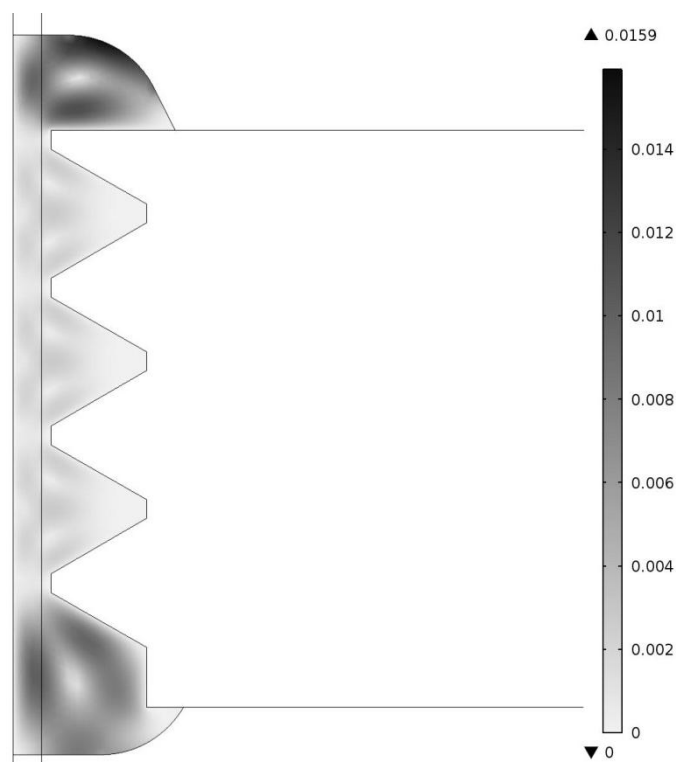


Рис. 6. Вихревые структуры, возникающие в магнитной жидкости и образованные радиальной и азимутальной компонентами скорости

На рис. 7 представлены графики зависимости максимальной вихревой скорости в зазоре МЖГ от величины зазора, рассчитанной по методу, изложенному в [10] – кривая 1 и с учетом изменения вязкости от величины магнитного поля – кривая 2.

Конечно применение формулы (4) вызывает ряд вопросов, так как в ней не учтены тип магнитной жидкости, концентрация дисперсной фазы и т.д., более корректными были бы экспериментальные исследования для каждого типа жидкости зависимости вязкости от величины магнитного поля.

Однако качественный анализ полученных графиков позволяет сделать вывод о том, что при больших величинах зазоров силы магнитного поля достаточно успешно борются с центробежными силами. Значение максимальной вихревой скорости уменьшается в среднем в 3 раза и самое главное, что рост вихревой скорости при учете изменения вязкости значительно уменьшается по сравнению с кривой 1. Это говорит о принципиальной возможности расширения области применения МЖГ за счет работы на повышенных зазорах. Однако это требует подтверждения экспериментальных и опытно-промышленных испытаний.

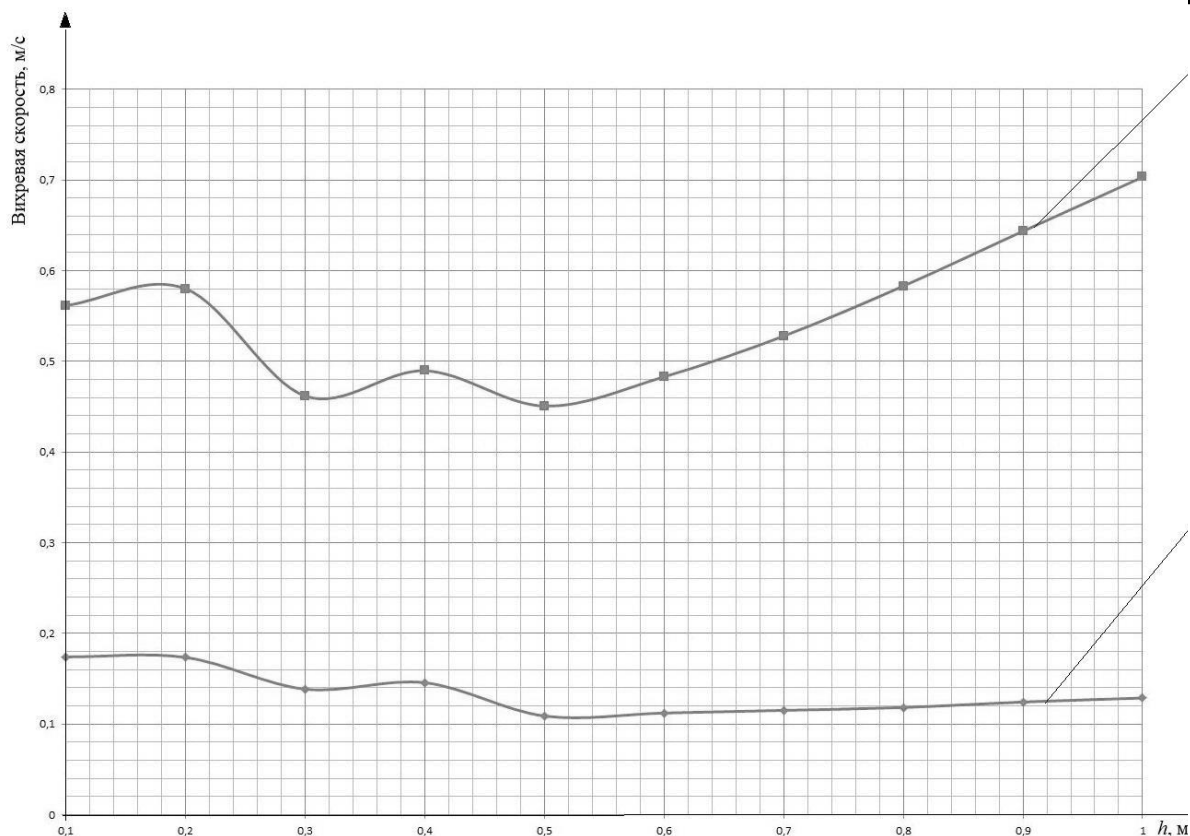


Рис. 7. Максимальные вихревые структуры, возникающие в магнитной жидкости и образованные радиальной и азимутальной компонентами скорости в зазоре от 0,1 до 1 мм:
 1 – вихревая структура при постоянной вязкости МЖ;
 2 – вихревая структура при переменной вязкости по формуле (4)

Выводы

1. Разработана математическая модель для анализа магнитного поля в рабочей зоне МЖГ с учетом нелинейных магнитных свойств материалов магнитопровода и вала.
2. Разработана гидродинамическая модель для расчета ламинарного течения магнитной жидкости в зазоре МЖГ.
3. Анализ гидродинамической модели показал принципиальную возможность эксплуатации МЖГ при величинах зазоров, превышающих 0,3 мм.
4. Результаты компьютерного моделирования были использованы при проектировании МЖГ центробежного вентилятора ВЦ-25 и осевого вентилятора ВОД-30М. Ввиду биения, эксцентриситеты валов и т.д. величины зазоров составляли порядка 0,4-0,9 мм. Были изготовлены следующие герметизаторы – МЖГ вентиляторов ВЦ-25 для шахты "Юбилейная" ОАО "Павлоградуголь", установленные в июне 2010 г. и декабре 2012 г. и МЖГ вентиляторов ВОД-30М для шахты "Терновская" ОАО "Павлоградуголь", установленные в апреле и декабре 2011 г. Как показал опыт эксплуатации и сравнительных испытаний, такие технические решения оказались удачными.

Загальні питання технології збагачення

Список літератури

1. Хабазня А.С., Радионов А.В., Виноградов А.Н., Казакуца А.В. Особенности проектирования магнитоожидкостных герметизаторов шахтного оборудования // Уголь Украины. – 2010. – Вып. 2(648). – С. 29-33.
2. А.С. СССР №840773. Магнитомер / Крикун В.А., Радионов В.А., Борозенец В.Г. и др. / заявл. 27.09.1978. опубл. 23.06.1981, бюл. №23.
3. Chari M.V.K., Laskasis E. T., D'Angelo J. Finite element analysis of a magnetic fluid seal for large-diameter high-speed rotating shafts // IEEE Transactions On Magnetics. – 1981. – Vol. Maf.17. №6, November, – P. 3000-3002.
4. Zoul J., Li X. Lu y., Hu J. Numerical analysis of centrifuge force in magnetic fluid rotating shaft seals // Journal of Magnetism and Magnetic Materials – 2002. – №252. – P. 321-323.
5. Полетаев В.А., Перминов С.М., Пахолкова Т.А., Перминова А.С. Исследование магнитного поля рабочего зазора магнитоожидкостного герметизатора классической конструкции // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 6. – С. 38-42.
6. Salwinski J., Horak W., Szczech M., Numerical analysis of magnetic circuits in the ferrofluid seals // Технології та дизайн. – 2012. – Вип. 3(4). – С. 108-112.
7. www.comsol.com
8. Kumbhar G. B., Kulkarni S.V., R. Escarela-Perez, E. Campero-Littlewood, .Applications of coupled field formulations to electrical machinery // The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 2007. – Vol. 26, Issue 2. – P. 489-523.
9. Radionov A., Podoltsev A., Zahorulko A. Finite-Element Analysis of Magnetic Field and the Flow of Magnetic Fluid in the Core of Magnetic-Fluid Seal for Rotational Shaft // XIIIth International Scientific and Engineering Conference "HERVICON-2011". Procedia Engineering. – 2012. – № 39. – P. 327-338
10. Радионов А.В., Подольцев А.Д., Загорулько А.В. Конечно-элементный анализ магнитного поля и течения магнитной жидкости в активной зоне магнитоожидкостного герметизатора вращающегося вала // Вибронадежність і герметичність центробежних машин. – 2011. – С. 173-187 .
11. Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Страдомский Ю.И., Перминов С.М. Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование. – Иваново, 2010. – 183 с.

© Радионов А.В., Борцов А.С., 2013

*Надійшла до редколегії 06.02.2013 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*