

Исследование магнитного поля и удерживающей способности рабочего зазора магнитожидкостного уплотнения с зубцами прямоугольной формы

С.М. Перминов
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: psm@upm.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время в магнитожидкостных уплотнениях за рубежом получили распространение зубцы-концентраторы прямоугольной формы, в отечественных изделиях применяются зубцы трапециевидальной формы. Если свойства зубцов трапециевидальной формы достаточно хорошо изучены, то по прямоугольным зубцам информация практически отсутствует. Исследование свойств зубцов прямоугольной формы представляет как научный, так и практический интерес.

Материалы и методы: Определение магнитного поля в рабочем зазоре магнитожидкостного уплотнения экспериментальными способами невозможно, поэтому исследование выполнено с помощью моделирования магнитного поля методом конечных элементов. При моделировании использована дифференцированная конечно-элементная сетка из полумиллиона треугольных элементов с учетом нелинейной зависимости свойств магнитных материалов от напряженности магнитного поля.

Результаты: Найдены зависимости максимальных удельных проводимостей рабочего зазора от толщины зубца и геометрической характеристики канавки между зубцами. Показано, что индукция в зубце прямоугольной формы снижается от его основания к вершине, что объясняется наличием магнитных потоков, выходящих с боковых поверхностей зубца. Построены зависимости достигаемого перепада напряженности магнитного поля под зубцом от средней индукции в рабочем зазоре при различных значениях толщины зубца с учетом нелинейных свойств стали. Определены наиболее рациональные соотношения размеров канавок, разделяющих соседние зубцы.

Выводы: Моделирование выявило основные закономерности распределения параметров магнитного поля в рабочем зазоре магнитожидкостного уплотнения с зубцами прямоугольной формы. Установлено, что выполнение зубцов малой толщины приводит к значительному изменению индукции по высоте зубца и не позволяет достичь высоких значений максимальной напряженности поля в рабочем зазоре, а следовательно, и высоких удерживаемых перепадов давлений. Для повышения удерживаемого прямоугольным зубцом перепада давлений необходимо увеличивать толщину зубца и среднюю индукцию в рабочем зазоре.

Ключевые слова: магнитожидкостное уплотнение, магнитное поле, максимально удерживаемый перепад давлений, прямоугольные зубцы.

Study of magnetic fields and storage capacity of magnetic fluid seal air gap with rectangular teeth

S.M. Perminov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: psm@upm.ispu.ru, elmash@em.ispu.ru

Abstract

Background: Rectangular teeth-concentrators are widely used now abroad in magnetic fluid sealing, while it is more usual to use trapezoidal teeth in our country. Therefore, trapezoidal teeth are studied quite well but there is little information about rectangular teeth, which makes it relevant to study rectangular teeth both theoretically and practically.

Materials and Methods: It is impossible to evaluate magnetic field in the air gap of a magnetic fluid seal experimentally. Therefore, the study was conducted based on magnetic field modeling by the finite-element technique. The simulation was made using a differentiated finite element mesh consisting of half a million triangular elements taking into account the non-linear dependence of the properties of magnetic materials on the magnetic field.

Results: We have determined the dependence of the maximal specific conductivity of the air gap on the tooth thickness and the geometric characteristics of the grooves between the teeth. It was shown that the induction of a rectangular tooth reduces from its base to the top, which is explained by magnetic fluxes emerging from the side surfaces of the teeth. We found the dependences of the differential of magnetic field strength under the tooth on the average air gap induction at different values of the tooth thickness by taking into account the non-linear properties of the steel. We also determined the most efficient ratio of the sizes of the grooves separating the adjacent teeth.

Conclusions: The simulation revealed the basic laws of distribution of the magnetic field parameters in the magnetic fluid seal air gap with rectangular teeth. It was concluded that thin teeth significantly change the induction of the tooth height and make it impossible to achieve high values of the maximum field strength in the air gap and thus to withstand high pressure differential values. To increase the pressure differential held by rectangular teeth, it is necessary to increase the tooth thickness and the average induction in the air gap.

Key words: magnetic fluid seal, magnetic field, the maximum pressure differential held, rectangular teeth.

В рабочих зазорах магнитоожидкостных уплотнений (МЖУ) в целях повышения их эффективности формируют высоко градиентное магнитное поле с помощью концентраторов магнитного поля зубцов различной формы [1]. В России широко используются зубцы с трапецеидальной формой аксиального сечения [2]. За рубежом распространена прямоугольная форма зубца [3–5]. Прямоугольная форма зубца более проста конструктивно и технологична при изготовлении. В то же время сравнительные испытания уплотнений с трапецеидальной и прямоугольной формой зубцов показали, что последние обладают более высокими моментами трения [6], что приводит к дополнительным потерям энергии и разогреву.

Основным параметром зубца является максимально удерживаемый перепад давлений. Удерживающая способность магнитоожидкостной пробки в рабочем зазоре, расположенной под зубцом, определяется по формуле

$$\Delta p = \mu_0 \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} M dH, \quad (1)$$

где H – напряженность магнитного поля в зазоре; $H_{\max}$ и $H_{\min}$ – максимальная и минимальная напряженности магнитного поля на границах магнитоожидкостной пробки в момент удержания ею максимального перепада давлений [4].

В [7] проанализировано распределение напряженности поля в рабочем зазоре с трапецеидальной формой зубцов, определено положение магнитоожидкостной пробки в момент удержания максимального перепада давлений, показано, что за $H_{\max}$ и $H_{\min}$ необходимо принимать максимальную и минимальную напряженности магнитного поля на поверхности вала в пределах ширины зубца. Точка с максимальной напряженностью $H_{\max}$ расположена в области минимального зазора под острием зубца, точка с минимальной напряженностью $H_{\min}$ находится на поверхности вала на границе соседних зубцов. Экстремальные значения напряженности поля на поверхности вала $H_{\max}$ и $H_{\min}$ определяются геометрической характеристикой зубцов и средней индукцией в рабочем зазоре, магнитопроводящими свойствами материала зубца. Влияние геометрии зубца с трапецеидальной формой сечения на магнитное поле в рабочем зазоре в настоящее время хорошо изучено [8, 9]. Зубцы с прямоугольной формой до настоящего времени в России детально не исследовались, а информация о наиболее рациональных геометрических соотношениях формы зубца в зарубежной научно-технической литературе практически отсутствует. Поэтому вопросы определения удерживающей способности зубца прямоугольной формы и нахождения наиболее оптимальных его геометрических соотношений представляют как научный, так и практический интерес.

Основные геометрические параметры прямоугольного зубца. Геометрические параметры зубцов принято выражать в относительных единицах. За базовую величину принимается минимальная величина рабочего зазора δ (рис. 1). Основными геометрическими параметрами прямоугольного зубца являются: ширина зубца b ; толщина t_1 ; высота h ; ширина канавки $t_2 = b - t_1$.

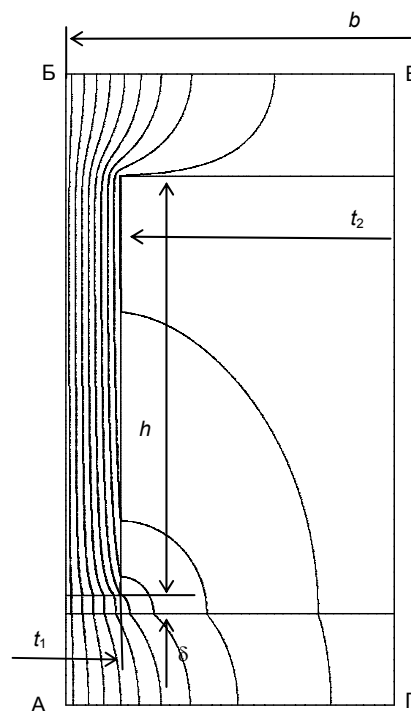


Рис. 1. Зубец прямоугольной формы

Метод решения задачи. Поставленная задача решалась методом математического моделирования магнитного поля в рабочем зазоре МЖУ с использованием метода конечных элементов. При расчете учитывались нелинейные свойства материала зубца и принималось допущение, что магнитная жидкость в зазоре отсутствует. На рис. 1 показана расчетная область, которая состоит из половины симметричного зубца. Граничные условия задавались следующим образом: на границе АВ векторный магнитный потенциал A постоянен и равен 0; на границе ВГ магнитный потенциал A постоянен и определяется исходя из задаваемой средней индукции в зазоре; на границах БВ и АГ касательное поле $H_\tau = 0$. Расчетная сетка имела дифференцированный характер распределения элементов: с наименьшими элементами в области минимального зазора и более крупными у границ расчетной области. Количество элементов расчетной сетки колебалось в пределах 210–840 тысяч.

Согласно (1), для повышения удерживаемого зубцом перепада давлений необходимо увеличивать перепад экстремальных напряженностей магнитного поля на поверхности вала ΔH , т.е. повышать $H_{\max}$ и понижать $H_{\min}$.

На максимальную напряженность магнитного поля на поверхности вала влияет разность магнитных потенциалов между магнитопроводящими поверхностями вала и зубца и толщина зубца t_1 . В [7] предложено напряженность H в любой точке зазора оценивать в сравнении с базовой напряженностью H_B , которая определяется как

$$H_B = F/\delta, \quad (2)$$

где F – магнитодвижущая сила (МДС), создающая поле в зазоре; δ – величина минимального зазора.

Отношение $H_{\max}/H_B = \lambda_{\max}$ называется максимальной удельной проводимостью рабочего зазора и показывает, во сколько раз напряженность поля на поверхности вала отличается от максимально возможной напряженности, когда толщина зубца равна ширине зубца и поле в зазоре однородное. Отношение $H_{\min}/H_B = \lambda_{\min}$ называется минимальной удельной проводимостью рабочего зазора. Разность $\lambda_{\max} - \lambda_{\min} = \Delta\lambda$ называется перепадом экстремальных удельных проводимостей рабочего зазора.

Поиск рациональной геометрии при отсутствии насыщения стали зубца. На первом этапе исследовалось поле в зазоре при отсутствии насыщения материала зубца. Относительная магнитная проницаемость материала зубца в расчетах принималась постоянной $\mu = 1000000$.

Выбор ширины площадки на острие зубца. При прямоугольной форме зубца ширина площадки на острие зубца равна его толщине t_1 . При малой ширине площадки на острие зубца, соизмеримой с величиной рабочего зазора ($t_1 \approx \delta$), магнитный поток, выходящий из горизонтальной поверхности вершины зубца, проходя на пути к валу, рассредоточивается (рис. 2,а). Линии векторного магнитного потенциала выпучиваются в канавки между зубцами, их концентрация на оси симметрии зубца в направлении к поверхности вала снижается, со-

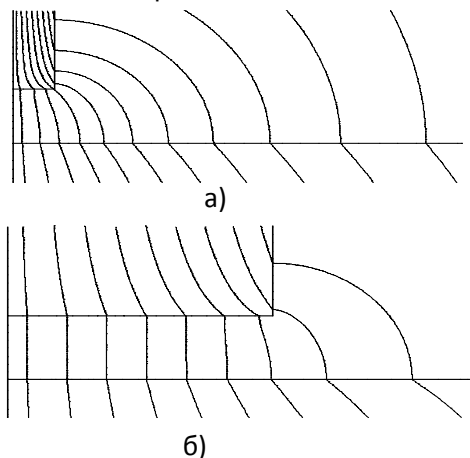


Рис. 2. Распределение линий векторного магнитного потенциала в области минимального зазора

ответственно снижается напряженность магнитного поля. Чем меньше толщина зубца, тем выше разница между напряженностью поля у поверхности вершины зубца и поверхности вала. Увеличение ширины площадки на острие зубца приводит к снижению влияния процесса выпучивания линий векторного магнитного потенциала на поле в центральной части минимального зазора, напряженность поля выравнивается (рис. 2,б). На рис. 3 приведена зависимость максимальной удельной проводимости рабочего зазора от толщины зубца t_1 , полученная на основе моделирования магнитного поля в рабочем зазоре. Анализ полученной зависимости показывает, что увеличение ширины площадки приводит к росту $H_{\max}$, следовательно, к росту удерживаемого зубцом перепада давлений. Рост замедляется при $t_1/\delta > 2$, где разница напряженностей $H_{\max}$ и H_B составляет менее 3 %, а при $t_1/\delta > 3$ менее 1 %. Использовать более высокие соотношения t_1/δ не имеет смысла, так как увеличение площадки сопровождается ростом магнитного потока зубца, что отражается на увеличении размеров источника магнитного поля при проектировании МЖУ в целом.

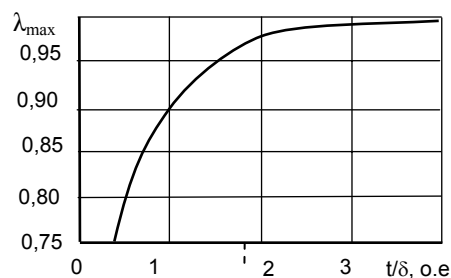


Рис. 3. Зависимость максимальной удельной проводимости рабочего зазора от толщины зубца

Высота зубца. Высота зубца h определяет глубину канавки между зубцами. Глубина канавки влияет на минимальную напряженность магнитного поля на поверхности вала $H_{\min}$. Минимальная напряженность определяется также разностью магнитных потенциалов между магнитопроводящими поверхностями вала и зубца и удаленностью точки от образующих канавку поверхностей. Чем ближе данная точка расположена к образующим поверхностям зубца, тем выше значение минимальной напряженности. Т.е. на $H_{\min}$ влияет геометрическая характеристика канавки – соотношение высоты и ширины канавки h/t_2 . На рис. 4 показана зависимость минимальной удельной проводимости рабочего зазора $\lambda_{\min}$ от геометрической характеристики канавки. Анализ характера кривой показывает, что при отсутствии насыщения зубца высоту зубца делать больше ширины канавки нерационально, достаточно ограничиться значением $h/t_2 = 0,8$. В дальнейших исследованиях принимаем условие, что высота зубца равна 0,8 ее ширины.

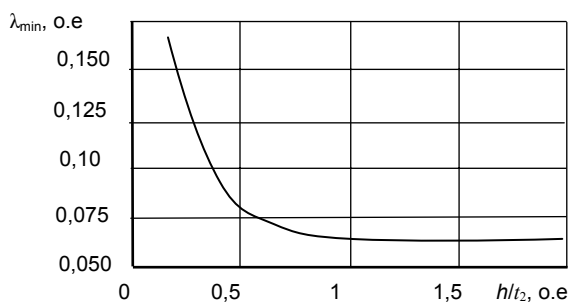


Рис. 4. Зависимость минимальной удельной проводимости рабочего зазора от размера канавки

Ширина канавки между зубцами. Для фиксированной толщины зубца $t_1 = 4$, и геометрической характеристики канавки $h/(b-t) = 0,8$ была построена зависимость минимальной удельной проводимости $\lambda_{\min}$ и перепада экстремальных удельных проводимостей $\Delta\lambda$ рабочего зазора от ширины канавки (рис. 5). Анализ зависимостей показывает, что канавки между прямоугольными зубцами наиболее рационально выполнять шириной в диапазоне $t_2 = (20-30)\delta$. При меньших значениях t_2 наблюдается ощутимое снижение перепада экстремальных удельных проводимостей $\Delta\lambda$ и, соответственно, удерживаемого зубцом перепада давлений. Увеличение t_2 более 30δ дает незначительную прибавку $\Delta\lambda$ и будет приводить к возрастанию длины уплотнения.

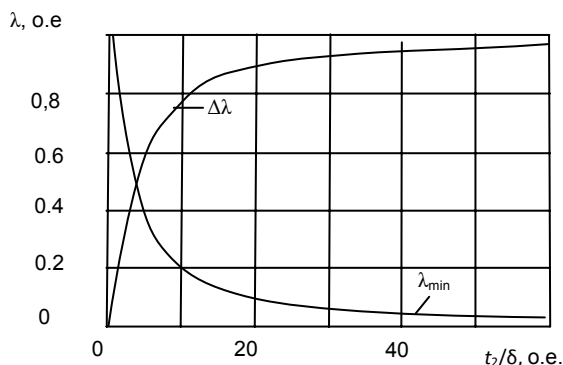


Рис. 5. Зависимости удельных проводимостей рабочего зазора от ширины канавки: $\lambda_{\min}$ — минимальная удельная проводимость; $\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$ — разность удельных проводимостей

Распределение индукции по высоте прямоугольного зубца. На рис. 6 показано распределение индукции на линии симметрии прямоугольного зубца с геометрическими параметрами: $t_1/\delta = 3$, $t_2 = 30\delta$, $h/t_2 = 0,8$, при средней индукции в рабочем зазоре $B_{cp} = 0,22$ Тл. Максимум индукции наблюдается у основания зубца на стыке с полюсной приставкой, где индукция равна 2,3 Тл, что соответствует индукции насыщения большинства технических сталей. Индукция в зубце снижается в направле-

нии от его основания к вершине. Наиболее интенсивное снижение индукции наблюдается при приближении к минимальному зазору. На границе с зазором индукция в зубце составляет 0,95 Тл. Индукция снизилась при переходе от основания к вершине зубца в 2,4 раза. Снижение индукции объясняется наличием магнитных потоков, выходящих с боковых поверхностей зубца. Расчет показал, что для исследуемой геометрии зубца потоки, выходящие с боковых поверхностей зубца, превышают поток, выходящий с площадки t_1 в 1,16 раза, т. е. больше половины потока зубца ответвляется через боковую поверхность. При прямоугольной форме толщина зубца по высоте постоянна. Интенсивность выходящих потоков с каждой единицы площади боковых поверхностей возрастает к вершине зубца, что и объясняет резкое снижение индукции при приближении к зазору. Проведенные исследования показали, что ширина площадки $t_1 = (3-4)\delta$, считающаяся оптимальной для трапецеидальной формы зубца, не позволяет получать приемлемые значения максимальной индукции в рабочем зазоре уплотнения для зубца прямоугольной формы.

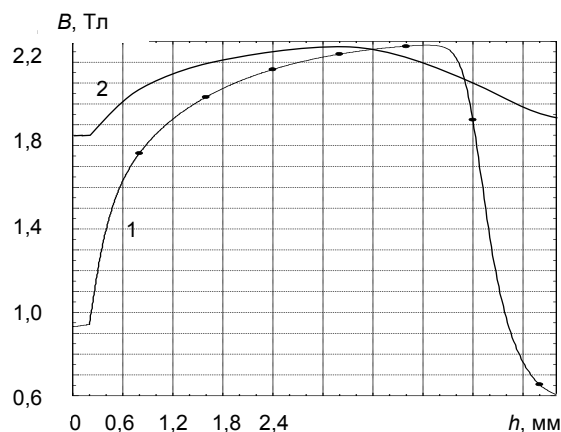


Рис. 6. Изменение индукции на оси симметрии зубца в направлении от поверхности вала к основанию зубца: 1 — $t_1/\delta = 3$; 2 — $t_1/\delta = 12\delta$

Увеличить максимальную индукцию в рабочем зазоре можно, изменив соотношение магнитных потоков, выходящих с площадки t_1 и боковых поверхностей зубца. Если первый поток будет значительно превышать второй, то не должно наблюдаться значительного изменения индукции от основания к вершине зубца. На рис. 6 кривая 2 показывает характер изменения индукции на оси симметрии зубца толщиной $t_1 = 12\delta$, при максимальной индукции в стали у основания зубца 2,3 Тл. Анализ кривой показывает, что увеличение толщины зубца привело к уменьшению скорости снижения индукции по высоте зубца и росту максимальной индукции в рабочем зазоре до 1,87 Тл. Таким образом, в прямоугольном зубце ширина основания

зубца является определяющим фактором для достижения максимально возможной индукции в рабочем зазоре, своеобразным ограничителем максимальной индукции. С ростом средней индукции в рабочем зазоре сталь входит в насыщение в первую очередь в основании зубца, что ограничивает индукцию на вершине зубца и в рабочем зазоре.

Влияние толщины зубца на изменение индукции от основания к его вершине. Так как выше было установлено, что существует значительная разница между индукциями в основании и вершине зубца, зависящая от его толщины, был проведен численный эксперимент по определению влияния толщины на величину изменения индукции в зубце. В эксперименте высота зубца и размеры канавки были зафиксированы: $t_2 = 30\delta$, $h/t_2 = 0,8$, менялась только толщина зубца t_1 . На рис. 7 показана зависимость изменения индукции на острие относительно индукции в основании зубца от толщины зубца при отсутствии насыщения стали. Анализ полученной кривой показывает, что для снижения падения индукции в зубце при переходе от его основания к вершине следует увеличивать толщину зубца. Выполнять зубцы толщиной $t_1/\delta < 10$ нерационально, так как наблюдается существенное падение индукции на вершине относительно индукции в основании зубца.

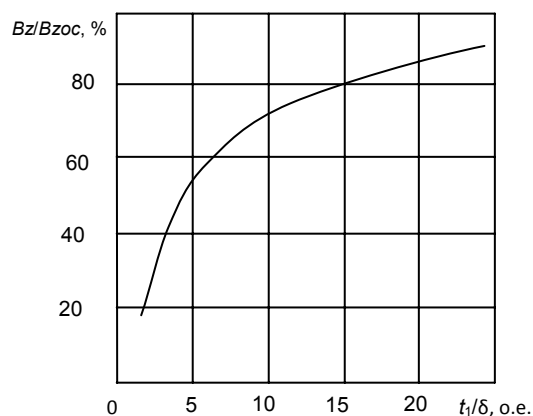


Рис. 7. Зависимость изменения индукции на острие относительно индукции в основании зубца от толщины зубца при отсутствии насыщения стали

Определение удерживающей способности прямоугольного зубца с учетом насыщения стали. В качестве материала зубца была выбрана сталь Ст.3, широко применяемая в электротехнических изделиях. В расчетах использовалась кривая намагничивания стали, приведенная в [10]. Определялась взаимосвязь между толщиной зубца t_1/δ , средней индукцией в рабочем зазоре и достигаемым перепадом напряженности поля под зубцом, который, согласно (1), определяет удерживаемый зубцом перепад

давлений. Исследования проводились при постоянных размерах канавки между зубцами ($t_2 = 30\delta$, $h/t_2 = 0,8$). На рис. 8 приведены зависимости достигаемого перепада напряженности магнитного поля под зубцом от средней индукции в рабочем зазоре при различных значениях толщины зубца. Анализ характера зависимостей показывает, что увеличение средней индукции в зазоре приводит к росту перепада напряженности поля под зубцом, но для каждой заданной толщины зубца существует определенное значение средней индукции в зазоре, приводящее к насыщению стали зубца и прекращению увеличения ΔH . Для каждой выбранной толщины зубца существует оптимальное значение средней индукции в рабочем зазоре, обеспечивающее достижение максимального перепада напряженности под зубцом и, соответственно, его максимальной удерживающей способности. Максимальных значений перепада напряженности поля можно достичь, увеличивая толщину зубца ($t_1/\delta > 20$) и среднюю индукцию в рабочем зазоре ($B_{cp} > 0,8$).

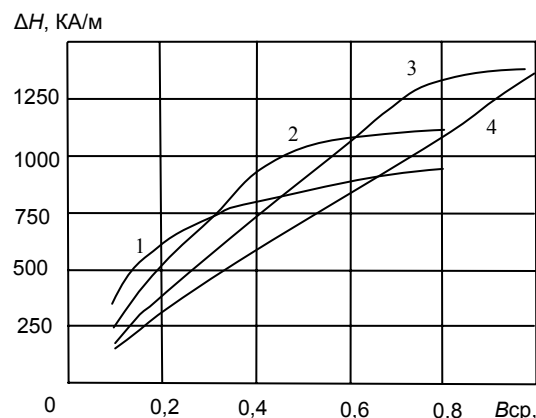


Рис. 8. Зависимости перепада напряженности поля под прямоугольным зубцом от средней индукции в зазоре: 1 – при $t_1/\delta = 3$; 2 – при $t_1/\delta = 6$; 3 – при $t_1/\delta = 12$; 4 – при $t_1/\delta = 24$

Заключение

Исследование магнитного поля в рабочем зазоре МЖУ с зубцами прямоугольной формы позволило определить наиболее рациональные соотношения размера канавок, разделяющих соседние зубцы, и высоты зубца.

Выполнение зубцов малой толщины $t_1 \approx (2-4)\delta$ приводит к значительному изменению индукции по высоте зубца, не позволяет достигать высоких значений максимальной напряженности поля в рабочем зазоре, а следовательно, удерживаемых перепадов давлений. Для повышения удерживаемого прямоугольным зубцом перепада давлений необходимо увеличивать толщину зубца и среднюю индукцию в рабочем зазоре.

Список литературы

1. Михалев Ю.О., Орлов Д.В., Страдомский Ю.И. Исследование феррожидкостных уплотнений // Магнитная гидродинамика. – 1979. – № 3. – С. 69–79.
2. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин и др.; под общ. ред. Д.В. Орлова, В.В. Подгоркова. – М.: Машиностроение, 1993. – 272 с.
3. Такеоми С., Такидзуми С. Магнитные жидкости. – М.: Мир, 1993. – 272 с.
4. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. – М.: Мир, 1989. – 356 с.
5. Wilcock D.F., Eusepl M.W. Magnetic-centrifugal fluid seal. US Pat. №4304411, 1981.
6. Kim C.K., Mikhalev Y.O. Comparative study on the friction torque of highspeed magnetic fluid seals for ultra high vacuum // Тезисы докл. VII Междунар. Плесской конф. по магнитным жидкостям, Россия, Плес, 1998. – Иваново, 1998. – С. 201–203.
7. Орлов Д.В., Страдомский Ю.И. Расчет поля и статического удерживающего давления магнитоожидкостного уплотнения // Вопросы теории и расчета электрических машин и аппаратов: тематич. сб. науч.-исслед. тр. – Иваново, 1975. – С. 35–45.
8. Перминов С.М. Исследование распределения напряженности магнитного поля и магнитных потоков в магнитоожидкостном герметизаторе классической конструкции // Вестник ИГЭУ. – 2012. – № 6. – С. 32–36.
9. Перминов С.М. Исследование торцевого магнитоожидкостного герметизатора методом математического моделирования // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 5. – С. 36–39.
10. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1969. – 632 с.

References

1. Mikhalev, Yu.O., Orlov, D.V., Stradomskiy, Yu.I. Issledovanie ferrozhidkostnykh uplotneniy [Study of ferromagnetic fluid seals]. *Magnitnaya gidrodinamika*, 1979, no. 3, pp. 69–79.
2. Orlov, D.V., Mikhalev, Yu.O., Myshkin, N.K. *Magnitnye zhidkosti v mashinostroenii* [Magnetic fluids in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie, 1993. 272 p.
3. Takeomi, S., Takidzumi, S. *Magnitnye zhidkosti* [Magnetic fluids]. Moscow, Mir, 1993. 272 p.
4. Rozentsveyg, R. *Ferrogidrodinamika* [Ferrohydrodynamics]. Moscow, Mir, 1989. 356 p.
5. Wilcock, D.F., Eusepl, M.W. Magnetic-centrifugal fluid seal. US Pat. no. 4304411, 1981.
6. Kim, C.K., Mikhalev, Y.O. Comparative study on the friction torque of highspeed magnetic fluid seals for ultra high vacuum. *Tezisy dokladov VII mezhdunarodnoy Plesskoy konferentsii po magnitnym zhidkostyam* [Proceedings of the 7th international Plyos conference on magnetic fluids]. Ivanovo, 1998, pp. 201–203.
7. Orlov, D.V., Stradomskiy, Yu.I. Raschet polya i staticheskogo uderzhivayushchego davleniya magnitozhidkostnogo uplotneniya [Calculation of the field and static retaining pressure of magnetic fluid seals]. *Tematicheskiy sbornik nauchno-issledovatel'skikh trudov «Voprosy teorii i rascheta elektricheskikh mashin i apparatov»* [Collected works on science and technology «Theory and calculation of electrical machinery and apparatuses»]. Ivanovo, 1975, pp. 35–45.
8. Perminov, S.M. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 6, pp. 32–36.
9. Perminov, S.M. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 5, pp. 36–39.
10. Sergeev, P.S., Vinogradov, N.V., Goryainov, F.A. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow, Energiya, 1969. 632 p.

Перминов Сергей Михайлович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, зав. проблемной научно-исследовательской лабораторией прикладной феррогидродинамики,

телефон (4932) 38-57-98,

e-mail: psm@upm.ispu.ru