

## Роль площадки на острие зубца в формировании магнитного поля и удерживающей способности рабочего зазора магнитоидкостного уплотнения

В.А. Полетаев, д-р техн. наук, С.М. Перминов, канд. техн. наук, Т.А. Пахолкова, соиск.

Представлены результаты исследования магнитного поля в рабочем зазоре под зубцом магнитоидкостного герметизатора методом математического моделирования. Показано, что выполнение площадки на вершине зубца приводит к уменьшению радиальной составляющей градиента напряженности магнитного поля, росту напряженности поля на поверхности вала, повышению удерживаемого перепада давлений, а увеличение ширины площадки позволяет достичь более высоких абсолютных значений удерживаемого перепада давлений путем наращивания прикладываемой магнитодвижущей силы.

*Ключевые слова:* магнитоидкостный герметизатор, магнитное поле, распределение напряженности в рабочем зазоре.

## Influence of Tooth Point Ground on Forming Magnetic Field and Working Gap Retention Ability of Magnetic Fluid Seal

V.A. Poletaev, Doctor of Engineering, S.M. Perminov, Candidate of Engineering, T.A. Pakholkova, Applicant

The article deals with the research results of the magnetic field in the working gap under the tooth point of magnetic fluid seal by means of the mathematical modelling. It is shown that the ground at the tooth top causes the increasing of the radial component of the magnetic field gradient, the growth of the field on the shaft surface, the increasing of the pressure drops. Increasing the platform width allows to come up higher absolute values of the held pressure drop by increasing the magnetic motive force applied.

*Key words:* magnetic fluid sealer, magnetic field, strength distribution in the working gap.

В магнитоидкостных уплотнениях (МЖУ) используют различные формы концентраторов магнитного поля в рабочем зазоре зубцов: ряд из них имеют площадку на острие зубца, у других она отсутствует [1]. Роль площадки на острие зубца в настоящее время недостаточно изучена. Нами было проведено исследование на предмет актуальности выполнения площадки на острие зубца, ее влияния на магнитное поле и удерживающую способность рабочего зазора МЖУ.

В МЖУ наиболее распространен тип зубца с треугольной формой аксиального сечения (рис. 1,а) и его модификация с площадкой на острие зубца (рис. 1,б). Перепад давлений, удерживаемый магнитоидкостной пробкой в зазоре, расположенной под зубцом, определяется по формуле

$$\Delta p = \mu_0 \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} MdH,$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля в зазоре;  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$  – максимальная и минимальная напряженности магнитного поля на границах магнитоидкостной пробки в момент удержания ею максимального перепада давлений [2].

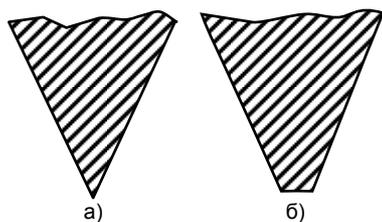


Рис. 1. Типы зубцов: а – с треугольной формой аксиального сечения; б – с площадкой на острие зубца

В работах [3–5] проанализировано распределение напряженности поля в зазоре под зубцами указанных форм, определено положение магнитоидкостной 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 границе зубца. Выполнение площадки на вершине зубца разумной ширины влияет на значение  $H_{\max}$  и практически не отражается на величине  $H_{\min}$  [5], поэтому представляет интерес исследование влияния ширины площадки на острие зубца на максимальную напряженность поля на поверхности вала. Поставленная задача решалась методом математического моделирования магнитного поля в рабочем зазоре МЖУ. Использовался метод конечных элементов. При расчете учитывались нелинейные свойства материала зубца и принималось, что магнитная жидкость в зазоре отсутствует.

Выбранная расчетная область состоит из половины симметричного зубца (рис. 2). Граничные условия задавались следующим образом: на границе АВ векторный магнитный потенциал  $A$  постоянен и равен 0 и на границе ВГ магнитный потенциал  $A$  постоянен и определяется исходя из задаваемой средней индукции в зазоре. На границах БВ и АГ касательное поле  $H_{\sigma} = 0$ . 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 210–270 тысяч.

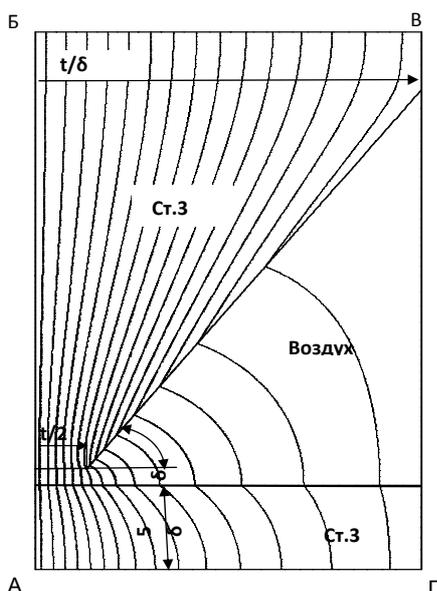


Рис. 2. Расчетная область

На первом этапе исследовалось поле в зазоре при отсутствии насыщения материала зубца. Определялась напряженность поля на оси симметрии зубца на расстоянии  $0,05\delta$  от поверхности зубца и поверхности вала. Под зубцом без площадки существует большая разница значений напряженности поля около острия зубца и около поверхности вала – значения напряженности поля отличаются в 2,5 раза. Магнитный поток, сконцентрированный зубцом и выходящий из его острия, рассредоточивается на пути к валу. Это и объясняет большую разницу значений напряженности поля. Такая радиальная неоднородность напряженности поля не способствует увеличению удерживающей способности зубца, создает дополнительные внутренние напряжения в магнитной жидкости, отрицательно сказывается на характеристиках момента трения и ресурсе уплотнения. Выполнение площадки на острие зубца приводит к выравниванию напряженности поля в области минимального зазора. Чем шире площадка, тем меньше разница между значениями напряженности поля у поверхности вала ( $H_{max}$ ) и поверхности зубца ( $H'_{max}$ ), при этом  $H_{max}$  возрастает. В [6] предложено напряженность  $H$  в любой точке зазора оценивать в сравнении с базовой напряженностью  $H_B$ , которая определяется как  $H_B = F / \delta$ ,

$F$  – магнитодвижущая сила (МДС), создающая поле в зазоре;  $\delta$  – величина минимального зазора.

Отношение  $H_{max} / H_B$  показывает, во сколько раз напряженность поля на поверхности вала отличается от максимально возможной напряженности, когда площадка выполнена во всю ширину зубца и поле в зазоре однородное. При отсутствии площадки на зубце  $H_{max}$  минимальна

и составляет 75 % от  $H_B$ . Увеличение ширины площадки приводит к росту  $H_{max}$  (рис. 3), а следовательно, и к росту удерживаемого зубцом перепада давлений. Рост замедляется при  $t/\delta > 2$ , где разница значений  $H_{max}$  и  $H_B$  составляет менее 5 %. Поэтому использовать более высокие значения соотношения  $t/\delta$  не имеет смысла, так как увеличение площадки сопровождается ростом магнитного потока зубца, что отражается на увеличении размеров источника магнитного поля.

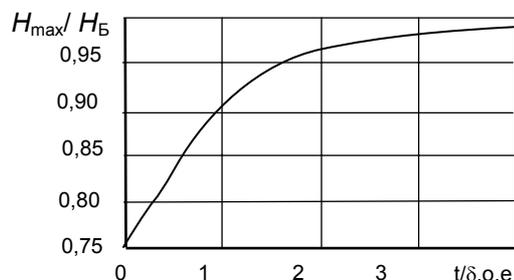


Рис. 3. Влияние ширины площадки на величину максимальной напряженности магнитного поля в рабочем зазоре

На втором этапе исследовалось влияние насыщения материала зубца на поле в рабочем зазоре. У зубца без площадки наблюдается раннее насыщение материала острия зубца, которое становится заметным при средней индукции в зазоре  $B_{cp} > 0,1$  Тл. Это сдерживает рост  $H_{max}$  при увеличении магнитодвижущей силы, приложенной к зубцовой зоне.

На рис. 4 показано, как меняется  $H_{max}$  при увеличении магнитодвижущей силы, приложенной к зубцовой зоне, для зубца с площадкой различной ширины.

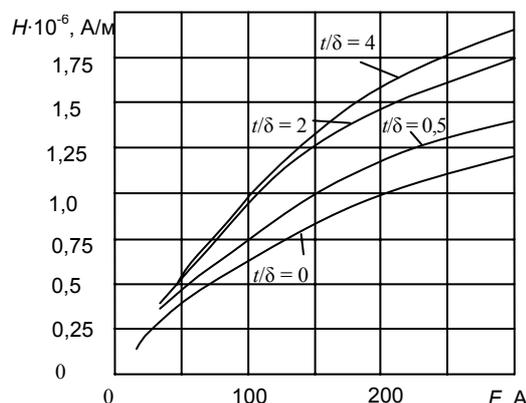


Рис. 4. Распределение напряженности поля на поверхности вала при различной величине рабочего зазора ( $6 \times 8$ )

Таким образом, зубец без площадки проигрывает по удерживаемому перепаду давлений зубцу с площадкой, и проигрыш увеличивается с ростом МДС, приложенной к рабочей зоне. Кроме этого, к недостаткам острого зубца можно отнести следующие: более высокую неоднородность напряженности поля в зазоре, более сложную технологию его выполнения, возможность появления разрывов металла на острие зубца при его изготовлении, повышенную уязвимость

острия зубца к механическим повреждениям. Во всем исследуемом диапазоне МДС увеличение ширины площадки приводит к росту  $H_{\max}$  и удерживаемого зубцом перепада давлений. Кроме этого, увеличение ширины площадки позволяет достичь более высоких абсолютных значений  $H_{\max}$  путем наращивания прикладываемой магнитодвижущей силы. Так, при МДС  $F = 200$  А зубец с площадкой  $t/\delta = 4$  удерживает перепад давлений, в 1,6 раза больший, чем зубец без площадки (рис. 4).

#### Список литературы

1. Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, Ю.И. Страдомский, С.М. Перминов. – Иваново, 2010. – 184 с.

2. Rosensweig R.E. Magnetic Fluids // Int. Sci. Tech. – 1966. – № 55. – P. 48–56.

*Перминов Сергей Михайлович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
заведующий проблемной научно-исследовательской лабораторией прикладной феррогидродинамики,  
кандидат технических наук, докторант кафедры электромеханики,  
телефон (4932) 38-57-98,  
E-mail: psm@urpm.ispu.ru

*Полетаев Владимир Алексеевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии автоматизированного машиностроения,  
телефон (4932) 26-97-72,  
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

*Пахолкова Татьяна Александровна,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
соискатель кафедры технологии автоматизированного машиностроения,  
телефон (4932) 26-97-73,  
E-mail: tanurah@mail.ru

3. Страдомский Ю.И., Перминов С.М., Борисов С.С. Исследование рабочей зоны магнитоэлектрического уплотнения // Мат-лы III Всесоюз. школы-семинара по магнитным жидкостям. – М.: МГУ, 1983. – С. 239–240.

4. Перминов С.М. Совершенствование магнитного поля в зазоре магнитоэлектрического герметизатора классической конструкции: сб. науч. тр. XII междунар. Плесской конф. по магнитным жидкостям, Россия, Плес. – Иваново, 2006.

5. Перминов С.М. Исследование магнитного поля рабочего зазора магнитоэлектрического герметизатора: сб. науч. тр. XIV Междунар. Плесской конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям, Россия, Плес. – Иваново, 2010. – С. 385–394.

6. Страдомский Ю.И., Перминов С.М. Магнитная проводимость зазора магнитоэлектрического уплотнителя и ее влияние на удерживаемый перепад давлений // Магнитные жидкости в электрических аппаратах с магнитоэлектрическим рабочим телом: межвуз. сб. науч. тр. – Иваново, 1982. – С. 47–57.