

УДК 538.4

DOI: <https://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2018.83.127732>

# Особенности работы высокоскоростных магнитожидкостных герметизирующих комплексов

А.В. Радионов<sup>1</sup> • А.Д. Подольцев<sup>2</sup> • Г. Печкис<sup>3</sup>

1 - ООО «НПВП «Феррогидродинамика», г. Николаев, Украина;

2 - Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев, Украина;

3 - Политехника Свентокшиская, г. Кельце, Польша

Received: 03 April 2018 / Accepted: 09 September 2018

*Аннотация.* Проанализировано взаимное влияние магнитных и центробежных сил в зазоре высокоскоростного магнитожидкостного герметизирующего комплекса. С использованием мультифизического моделирования изучен способ уменьшения влияния центробежных сил на работоспособность комплекса путем размещения концентраторов магнитного потока на вращающемся валу. Полученные результаты позволили расширить область применения магнитожидкостных герметизирующих комплексов при высоких линейных скоростях в зазоре и были использованы при разработке конструкции герметизирующего комплекса для газодувки, работающей на коксовом газе.

*Ключевые слова:* магнитожидкостный герметизирующий комплекс; центробежная сила; магнитная сила; рабочий зазор; магнитная жидкость; моделирование.

## Постановка проблемы и анализ последних публикаций

Факторы, незначительные при небольших скоростях, с увеличением скорости поверхности вала становятся существенными для работы магнитожидкостного герметизирующего комплекса (МЖГК). Они влияют как на удерживаемый герметизатором перепад давления, так и на ресурс работы МЖГ.

Прежде всего усложняется гидродинамика МЖГК. Причиной этого является тот факт, что на удержание магнитной жидкости (МЖ) в рабочем зазоре герметизатора, начинают влиять кроме магнитных ещё и центробежные силы, а к осевому градиенту давления, вызванному магнитной объёмной силой  $\mu_0 M_S \nabla H$ , добавляется радиальный градиент давления  $\sim v^2/R$ , вызванный движением жидкости.

По мере увеличения частоты вращения и диаметра уплотняемого вала растут линейная скорость поверхности вала и величина центробежных сил. Эти силы отбрасывают жидкость от поверхности вала, что приводит к ряду негативных последствий, вплоть до полного выброса МЖ из рабочего зазора.

Задача об устойчивости течения между вращающимися соосными цилиндрами (течение Тейлора-Куэтта) представляет собой классическую проблему гидродинамической и магнитогидродинамической устойчивости. Отличительной особенностью зазора в МЖГ по сравнению с аналогами в гидродинамике обычной жидкости является то, что зазор выполняется достаточно сложной геометрической формы (что необходимо для фокусировки магнитного потока), и объём жидкости ограничен не только твёрдыми, но и деформируемыми свободными границами. Также задача усложняется возможной неравномерностью рабочего зазора, нелинейными характеристиками намагниченности и магнитореологических свойств магнитной жидкости (МЖ).

Характерной особенностью таких вращательных течений является то, что при потере устойчивости первичного ламинарного течения возникает сразу не турбулентное течение, а вторичный ламинарный режим. При этом на первичное ламинарное течение накладывается система периодических вдоль оси вала меридиональных вихрей – так называемых вихрей Тейлора [1].

Ещё до появления вихрей ламинарное течение жидкости нарушается из-за появления наложенного осевого волнового процесса. Скорость наложенных волн равна 1/3 скорости на поверхности вала, появляется третья гармоническая колебательного процесса (мода  $m=2$ ) [2]. Азимутальная составляющая вектора скорости будет разлагаться только в ряд нечётных гармоник и по окружности зазора всегда будет иметь место целое число волн. Процесс имеет дискретный характер. Винтообразные линии тока замкнуты сами на себя, и течение является квазиламинарным.

✉ А.В. Радионов

ferrohydrodynamica@gmail.com

✉ Г. Печкис

peczkis@wp.pl

✉ А.Д. Подольцев

podoltsev.alexander@gmail.com

57

В работе [1] указывается, что вторичное ламинарное течение будет неустойчивым уже в слабом магнитном поле. Это хорошо согласуется с данными, приведёнными в [3]. Там отмечается, что при увеличении скорости вращения вала неустойчивость может наступать как при моде  $m=0$ , так и при  $m=1$  в слабых магнитных полях. Причем определить, какая из мод наиболее неустойчивая, фактически невозможно, так как сама мода зависит от величины магнитного поля, свойств МЖ и т. д.

Опыт стендовых испытаний [4] и авторского надзора за эксплуатацией МЖГ [5], накопленный в ООО «НПВП «Феррогидродинамика», показывает, что проблемы с выбросом из зазора МЖ начинаются при превышении линейной скорости в зазоре величины 15 м/с. Визуально было отмечено, что выброс мелкодисперсных капель МЖ происходит в азимутальном направлении. Это свидетельствует, что причиной выброса является развитие неустойчивости свободной поверхности. При увеличении линейной скорости до 35 м/с удержать МЖ в рабочей зоне МЖГК любой классической конструкции не удаётся. В первую очередь это связано с тем, что при выполнении концентраторов магнитного потока на магнитоприводах герметизатора действие центробежных сил совпадает с направлением градиента магнитной индукции.

Достаточно подробно в литературе освещён вопрос о трении в высокоскоростных МЖГК. Само по себе трение в МЖГК невелико, однако в работах [6, 7 и т. д.] указывалось, что при больших скоростях вращения вала пренебречь им нельзя. Вязкое трение приводит к разогреву МЖ, что ведёт к повышенному её испарению и десорбции молекул ПАВ с поверхности частиц. Оба фактора выводят из строя магнитную жидкость в зазоре герметизатора, а значит и сам МЖГ. В тоже время анализ эксплуатации более 4000 МЖГК в различных условиях, проведённый в НПВП «Феррогидродинамика», показывает, что из-за температурного разогрева МЖ выходов из строя МЖГ зафиксировано не было. Объяснение этому противоречию приводится в работе [8], где указывается, что для высокоскоростных МЖГК существенным является учёт термомагнитной конвекции, которая приводит к интенсивному циркуляционному течению в меридиональной плоскости непосредственно в узком рабочем зазоре над полюсом, снижая в этой области температуру жидкости. В целом это является положительным фактором и поэтому в отдельных конструкциях не следует применять специальных мер по ликвидации дополнительных течений.

Для повышения работоспособности высокоскоростных МЖГ необходимо принимать меры по удержанию МЖ в рабочем зазоре. В некоторой степени исключить влияние центробежных сил можно с помощью конструктивных изменений МЖГК.

Самым распространённым и наиболее эффективным в уплотнительной технике (гидродинамические импеллерные, лабиринтные, щелевые уплотнения и т.д.) для снижения влияния центробежных сил является выполнение лабиринтов на валу [9]. По аналогии с этим можно выполнить зубцовые концентраторы магнитного потока на валу, а не на магнитоприводе. В этом случае центробежные силы отбрасывают МЖ к вершине зубца в область максимального магнитного поля, что препятствует снижению критического перепада давления и выбросу магнитной жидкости из зазора.

В работе [3] указывается, что для течения Куэтта со сложной геометрией рабочего зазора, в настоящее время не получен критерий, позволяющий классифицировать вращение как устойчивое или как неустойчивое. Вопрос об истинной природе неустойчивости течения магнитной жидкости в МЖГК решается в каждом конкретном случае отдельно, так как определяющими являются свойства магнитной жидкости. Поэтому характер течения можно определить только с помощью прямого численного расчёта.

Целью данной работы является исследование взаимодействия магнитных и центробежных сил в рабочем зазоре герметизатора и на его основе разработка конструктивного исполнения МЖГК, расширяющего обычную область их применения.

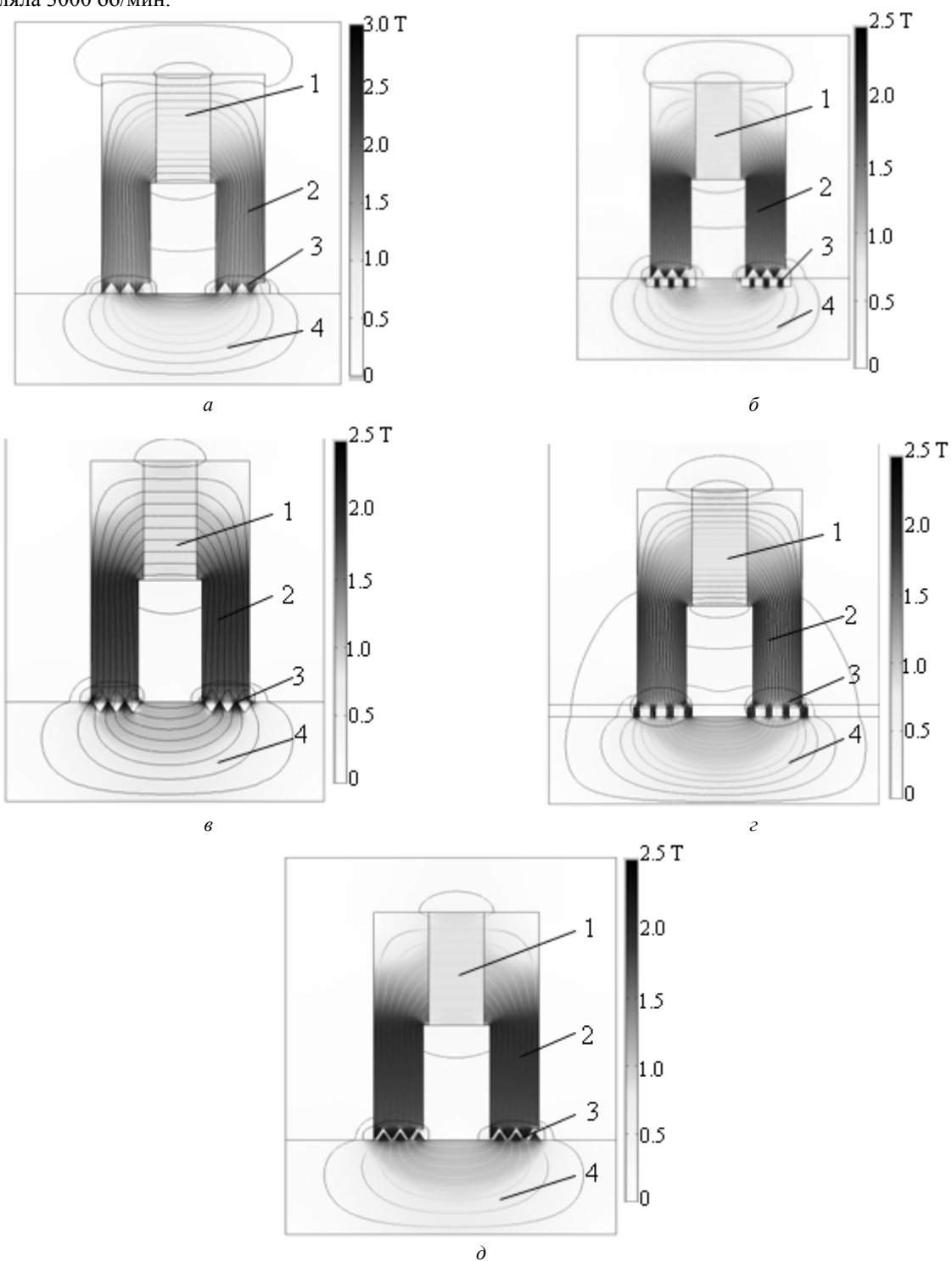
### **Изложение основного материала**

Моделирование гидродинамических процессов, происходящих в рабочем зазоре МЖГК, целесообразно осуществлять численными методами на основе полевых моделей, содержащих множество элементов. Такой обобщенный методологический подход к рассмотрению физических полей в рабочем зазоре МЖГК может быть выбран на основе метода мультифизического моделирования совокупности взаимосвязанных процессов различной физической природы [10].

С учетом того, что основные характеристики МЖГК определяются параметрами магнитного поля в рабочем зазоре, была разработана математическая модель взаимосвязанных нелинейных магнитных и гидродинамических процессов в зазоре МЖГК, достаточно подробно описанная в [11]. Модель рассчитывалась численным методом конечных элементов с помощью пакета программ Comsol [12].

Исследуемый герметизатор характеризуется осевой симметрией, отсюда полевая задача решалась в двухмерной постановке в цилиндрической системе координат. Расчетные области для анализа магнитного поля с различными вариантами расположения концентраторов магнитного потока и их формы приведены на рис. 1. Она содержит области с магнитными материалами трех типов: постоянные магниты 1, намагниченные в осевом направлении, ферромагнитный материал полюсов магнитной системы 2 и вращающегося вала 4, а также область, занятая магнитной жидкостью 3.

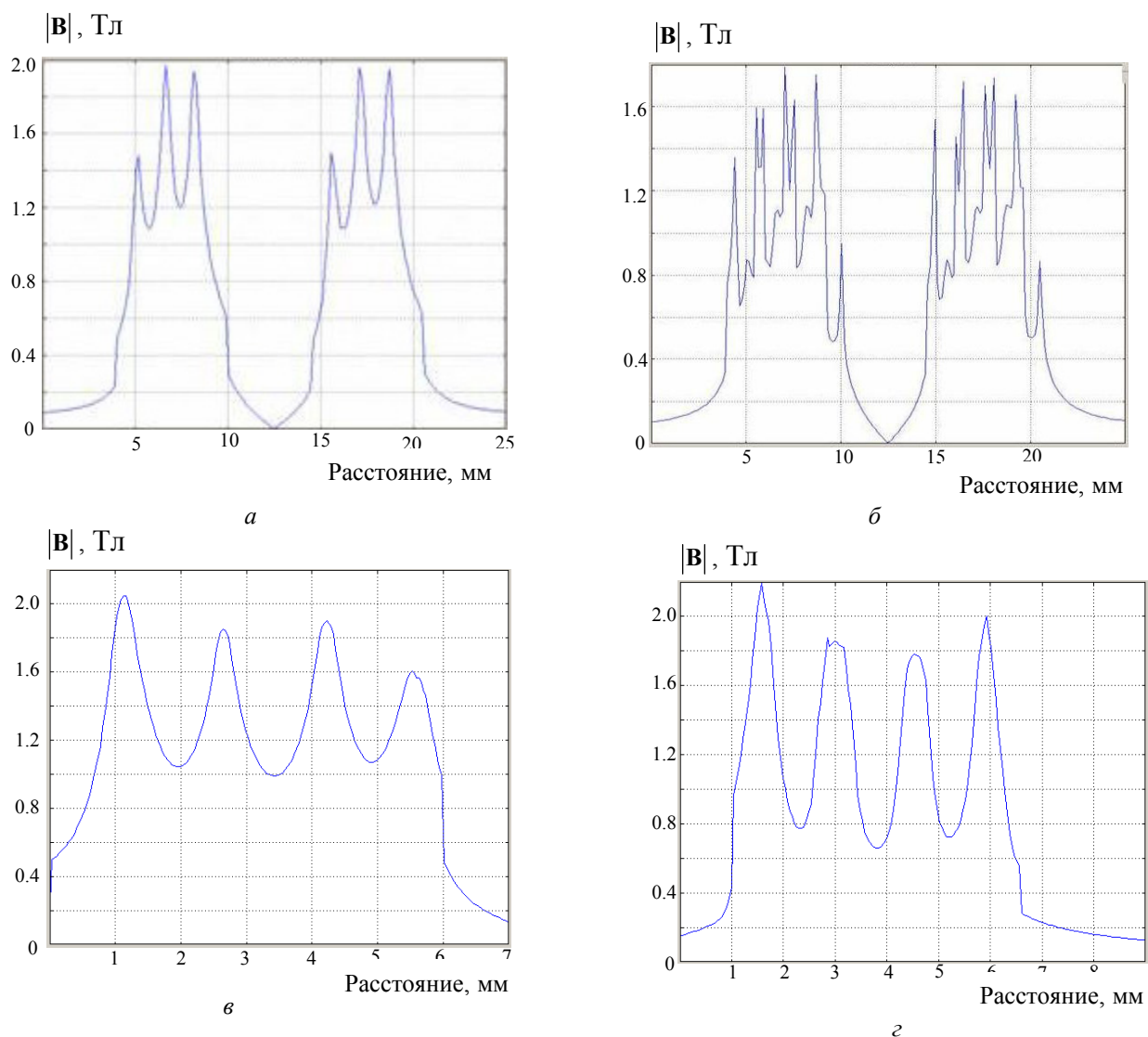
Исследования проводились для магнитопроводного вала диаметром 210 мм, частота его вращения составляла 3000 об/мин.



**Рис. 1. Распределение модуля вектора магнитной индукции (в цвете) и силовых линий векторного магнитного потенциала для:**

- a* – рис. 1.а. герметизатор классической конструкции; *б* – рис. 1.б. с зубцами на магнитопроводе трапецидальной формы и «внутренними» зубцами прямоугольной формы на валу; *в* – рис. 1.в. с «внутренними» зубцами трапецидальной формы на валу; *г* – рис. 1.г. с «внутренними» зубцами цилиндрической формы на валу; *д* – рис. 1.д. зубцами трапецидальной формы на магнитопроводе и «внешними» зубцами на валу

Распределение силовых линий магнитного поля и магнитной индукции также показаны на рис.1, на рис. 2 приведено распределение модуля вектора магнитной индукции под одним концентратором магнитного потока (полюсом) для различных расчетных схем.



**Рис. 2. Распределение модуля вектора магнитной индукции  $|B|$  под одним полюсом герметизатора по средней линии в зазоре:**

***a* – рис 2.а. с зубцами на магнитопроводе; *б* – рис 2.б. с зубцами на магнитопроводе трапецидальной формы и «внутренними» зубцами прямоугольной формы на валу; *в* – рис 2.в. с «внутренними» зубцами трапецидальной формы на валу; *г* – рис 2.г. с «внутренними» зубцами цилиндрической формы на валу;**

Кривые распределения магнитной индукции для всех рассматриваемых схем имеют однотипный волнообразный характер. При этом необходимо отметить, что размещение зубцов на валу способствует уменьшению падения поля под крайним внешним зубцом полюса (до 10%), которое всегда возникает из-за проявления концевой эффекта и выпучивания силовых линий магнитного поля, что является важным, так как именно через это место происходит выброс МЖ.

Анализ рис. 2б показывает уменьшение индукции магнитного поля примерно на 15% по сравнению с остальными рассматриваемыми вариантами.

При решении гидродинамической задачи течения МЖ в рабочем зазоре были использованы в следующие допущения:

- положение свободной границы магнитной жидкости в динамике при вращении вала совпадает с границами в статике;
- распределение магнитного поля в зазоре МЖГК при данном положении границы МЖ совпадает с распределением поля на рис. 1 и 2.

Распределение азимутальной компоненты скорости в рабочем зазоре показано на рис. 3. Из приведенных результатов расчета видно, что скорость монотонно уменьшается от значения 33 м/с на поверхности вала до нуля на поверхности магнитного полюса. Наиболее резкое изменение скорости происходит непосредственно под зубцами магнитной системы, т.е. в областях с минимальным зазором.

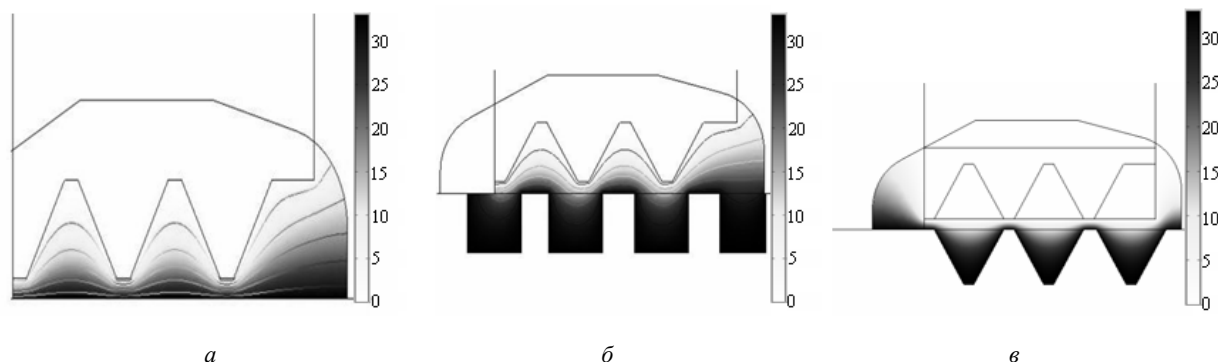


Рис. 3. Распределение азимутальной компоненты скорости течения магнитной жидкости в зазоре магнитной системы при скорости поверхности  $v_0 = 33 \text{ м/с}$  для:  
*a* – рис 3.а. герметизатор классической конструкции; *б* – рис 3.б. с зубцами на магнитопроводе трапецидальной формы и «внутренними» зубцами прямоугольной формы на валу; *в* – рис 3.в. с «внутренними» зубцами трапецидальной формы на валу

Отдельно анализировалось поле скоростей в концевой части МЖГК (крайний внешний зубец полюса). Из рассмотрения рис. 3б, 3в видно, что величина максимальной скорости в зазоре для всех вариантов размещением концентраторов магнитного потока на валу ниже, чем для МЖГК традиционной конструкции (см. рис 3а). Распределение азимутальной компоненты скорости при размещении на валу зубцов трапецидальной и прямоугольной формы практически одинаково, поэтому на рис. 3 приведено распределение только для одного варианта. Можно сделать вывод, что геометрическая форма концентраторов магнитного потока оказывает незначительное влияние на распределение скоростей в зазоре.

Следующим этапом исследований был анализ вихревых структур, образующихся в магнитной жидкости радиальной и азимутальной компонентами скорости.

Вихревые структуры приведены на рис. 4. Понятно, что структура с наибольшей вихревой скоростью возникает в крайней правой концевой области, что обусловлено наличием большой 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 магнитопроводов и особого влияния на выброс МЖ из рабочего зазора они не оказывают.

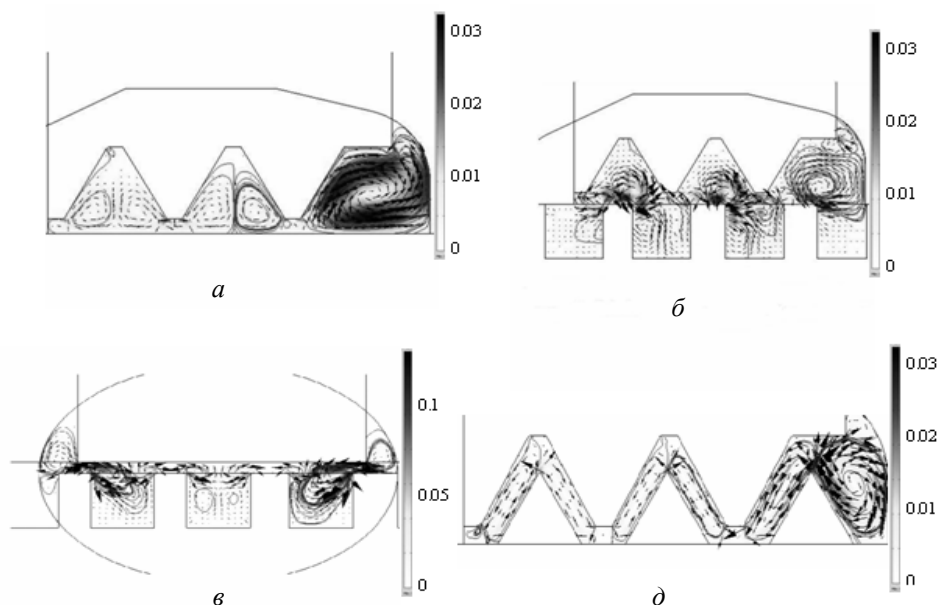


Рис. 4. Вихревые структуры, образованные радиальной  $u_r$  и осевой  $u_z$  компонентами скорости, а также абсолютная величина скорости  $\sqrt{u_r^2 + u_z^2}$ , в показания в цвете для:  
*a* – рис 4.а. герметизатор классической конструкции; *б* – рис 4.б. с зубцами на магнитопроводе трапецидальной формы и «внутренними» зубцами прямоугольной формы на валу; *в* – рис 4.в. с «внутренними» зубцами цилиндрической формы на валу; *д* – рис 4.д. зубцами трапецидальной формы на магнитопроводе и «внешними» зубцами на валу

Из рис. 4 видно, что направление действий вихря и вектора магнитной индукции прямо противоположны. Сравнение вихревых структур для МЖГК традиционной конструкции со всеми вариантами, где концентраторы магнитного потока были размещены на валу, показывает снижение абсолютной величины вихревой скорости при использовании изучаемого конструктивного решения.

С точки зрения происходящих в рабочем зазоре гидродинамических процессов наиболее приемлемой является схема с размещением зубцов как на магнитопроводе, так и «внешних» зубцов на валу. Однако реализация этой схемы требует очень высокой точности изготовления, кроме того опыт монтажа МЖГК, накопленный в ООО «НПВП «Феррогидродинамика» свидетельствует, что во многих случаях провести такой монтаж будет невозможно технологически.

Поэтому сравнивались варианты, приведенные на рис. 4б и 4в.

Было принято решение остановиться на варианте, представленном на рис. 4в. Несмотря на то, что вихревые структуры в варианте на рис. 4б имели ниже скорости, но уменьшение на приблизительно 15% магнитной индукции в зазоре по сравнению с вариантом на рис. 4в, было решающим, чтобы выбрать схему с «внутренними» зубцами цилиндрической формы на валу.

Данная схема была внедрена в конструкцию концевых уплотнений газодувки, работающей на коксовом газе, взамен штатных лабиринтных уплотнений.

Частота вращения вала составляла 3000 об/мин, избыточное давление на всасывании – 50 Па, избыточное давление нагнетания – 8000...15000 Па. Конструкция газодувки предусматривала осевое перемещение вала в процессе работы до 2 мм. Поэтому схема, представленная на рис. 1д, в любом случае не могла быть реализована.

МЖГК (рис. 5) выполнен единым моноблоком, включающим лабиринтное уплотнение и магнитожидкостный герметизатор. На вал 1 устанавливались втулка 2 из ферромагнитной стали. Участок втулки, расположенный напротив магнитопроводов изготовлен в виде сплошного выступа длиной 35 мм и наружным диаметром 160 мм. На наружной поверхности выступа нарезаны кольцевые зубцы. Для

удобства изготовления профиль зубца повторяет профиль метрической резьбы. В остальном конструкция МЖГК аналогична другим конструкциям «Феррогидродинамики», хорошо зарекомендовавших себя в промышленной эксплуатации.

### Выводы

1. Мультифизическим моделированием изучено взаимодействие магнитных и центробежных сил в рабочем зазоре МЖГК и показана возможность расширения области применения герметизаторов при высоких линейных скоростях в зазоре.

2. Показано, что размещение концентраторов магнитного потока на валу приводит к уменьшению падения магнитного поля под крайним внешним зубом до 10%

3. Показано, что размещение концентраторов магнитного потока на валу в несколько раз снижает величину вихревой скорости в концевой части герметизатора, причем направления вихря и вектора магнитной индукции противоположны.

4. Результаты мультифизического моделирования были использованы при разработке конструкции МЖГК для газодувки, работающей на коксовом газе.

## Особливості роботи високошвидкісних магніторідинних герметизуючих комплексів

О.В. Радіонов, О.Д. Подольцев, Г. Печкіс

*Анотація.* Проаналізовано взаємний вплив магнітних і відцентрових сил в зазорі високошвидкісного магніторідинного герметизуючого комплексу. З використанням мультифізичного моделювання вивчений спосіб зменшення впливу відцентрових сил на працездатність комплексу шляхом розміщення концентратів магнітного потоку на обертовому валу. Отримані результати дозволили розширити сферу застосування магніторідинних герметизуючих комплексів при високих лінійних швидкостях в зазорі і були використані при розробці конструкції герметизуючого комплексу для газодувки, працюючої на коксовому газі.

*Ключові слова:* магніторідиний герметизуючий комплекс; відцентрова сила; магнітна сила; робочий зазор; магнітна рідина; моделювання.

## The specific features of high-velocity magnetic fluid sealing complexes

A. Radionov, A. Podoltsev, G. Peczkis

**Abstract.** The factors, which are insignificant at small velocities, become rather considerable with increasing the shaft surface velocity as far as the magnetic fluid sealing complex (MFSC) is concerned. They impact both on the pressure drop restrained by the sealer and on MFS operational resource. The mutual influence of magnetic and centrifugal forces in the gap of the high-speed magnetic fluid sealing complex is analyzed. A method for reducing the effect of centrifugal forces on the performance of a complex by placing magnetic flux concentrators on a rotating shaft with the use of multi-physical modeling is studied. It is shown that the location of the magnetic flux concentrators on the shaft results in the decrease in the magnetic field drop under the last outer tooth by 10%. It is also shown that the location of magnetic flux concentrators on the shaft reduces the value of the vortex velocity in the end part of the sealer, the directions of the vortex and the magnetic induction vector are opposite each other. The obtained results allowed to expand the field of application of magneto-liquid hermetic complexes at high linear velocities in the gap and were used in the development of the design of the sealing gas-blowing complex, working on coke oven gas.

**Keywords:** magnetic fluid sealing complex; centrifugal force; magnetic force; working gap; magnetic fluid; modeling.

### References

1. Зибольд А.Ф. Эволюция ламинарных течений, порождаемых в цилиндре вращающимся магнитным полем [Текст] / А.Ф. Зибольд // Вісник Донецького національного університету. Сер. А: Природничі науки. - 2009. - вип. 2. - С. 77 - 89.
2. Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование [Текст] / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, Ю.И. Страдомский, С.М. Перминов. Под общ. ред. Ю.Б. Казакова: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». - Иваново, 2010. - 184 с.
3. Шалыбков Д.А. Гидродинамическая и гидромагнитная устойчивость течения Куэтта [Текст] / Д.А. Шалыбков // Успехи физических наук. - Том 179. - №9. - С. 971 - 994.
4. Белый В.Ф. Испытательный стенд конструкций МЖГ для уплотнения мелкодисперсных сыпучих сред [Текст] / В.Ф. Белый, В.И. Гавриш, А.В. Казакуца // 9 - я Международная Плесская конференция по магнитным жидкостям. Сборник научных трудов, т. II. - Иваново, 2000. - С. 401 - 404.
5. Радионов А.В. Опыт эксплуатации магнитожидкостных герметизаторов в промышленной энергетике [Текст] / А.В. Радионов // Гірничі електромеханіка та автоматика. - Дніпропетровськ, 2011. - Вип. 87. - С. 134 - 138
6. Берковский Б.М. Магнитные жидкости [Текст] / Б.М. Берковский, В.Ф. Медведев, М.С. Краков. - М.: Химия, 1989. - 240 с.
7. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика [Текст] / Р. Розенцвейг. - М.: Мир, 1989. - 356 с.
8. Краков М.С. Влияние меридионального течения и термомагнитной конвекции на характеристики магнитожидкостного уплотнения [Текст] / М.С. Краков, И.В. Никифоров // Журнал технической физики. - 2011. - Том 81, вып.12. - С.47 - 56.
9. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник [Текст] / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер и др.; Под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. - М.: Машиностроение, 1986. - 464 с.
10. Подольцев А.Д. Мультифизическое моделирование в электротехнике. Монография [текст] / А.Д. Подольцев, И.Н. Кучерявая. - К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. - 305 с.
11. Radionov A. Finite-Element Analysis of Magnetic Field and the Flow of Magnetic Fluid in the Core of Magnetic-Fluid Seal for Rotational Shaft [text] / A. Radionov, A. Podoltsev, A. Zahorulko // Procedia Engineering. - 2012. - № 39. - P. 327-328.
12. Comsol multiphysics modeling and simulation software. - <http://www.comsol.com>