

Г. Ш. БХАТ, А. КАЮМ, Ш. Ш. САЛИМ

ЭФФЕКТИВНОЕ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЕ МЭМС-ГИРОСКОПА НА БАЗЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ДИСКА ПРИ ПОМОЩИ ВОДНОГО НАНОРАСТВОРА ZrO_2 И МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ

МЭМС-гироскопы на базе вращающегося диска (МГВД) были разработаны для замены вибрационных гироскопов в электронных устройствах массового потребления. МГВД обладают высокой точностью, стабильностью и широким динамическим диапазоном при измерении параметров движения, стабилизации изображений и т.д. Вместе с тем для повышения их эксплуатационных характеристик и надежности, а также с целью уменьшить габариты, что обеспечит им конкурентные преимущества, необходимо их эффективное терморегулирование. Это остается актуальной проблемой, особенно при высоких тепловых нагрузках. Для улучшения тепловых характеристик МГВД рассматривается возможность применения наножидкостей, в частности водного раствора наночастиц диоксида циркония ZrO_2 пяти концентраций – 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8% и 1%. Исследования проводились при пяти скоростях вращения. Дополнительно анализировалось влияние на теплоотдачу различных уровней шероховатости поверхности диска – 0,025, 0,05 и 0,1 (в безразмерной форме) и скоростей вращения и концентрации наночастиц. Согласно наблюдениям, наночастицы повышают теплоотдачу. При угловой скорости 1000 рад/с и концентрации наночастиц 1% максимальное повышение теплоотдачи составило примерно 27%. Шероховатость поверхности вне зависимости от ее уровня оказывает минимальное влияние: теплоотдача возросла всего на 0,31%. Различные показатели эффективности прибора представлены графически. Результаты настоящего исследования могут быть полезны для улучшения тепловых характеристик МГВД за счет применения наножидкостей и соответствующих угловых скоростей при высоких тепловых нагрузках – до 500 Вт/см². Перечисленные методы способствуют миниатюризации компонентов и обеспечивают их конкурентоспособность на рынке электронных устройств широкого потребления.

Ключевые слова: гироскопы, вращающийся диск, МЭМС, управление движением, потребительская электроника, терморегулирование.

Бхат Гаухар Шафи. Лаборатория исследований турбулентности, факультет машиностроения, Государственный технический университет (Шринагар, Индия).

Каюм Аднан. Профессор, Лаборатория исследований турбулентности, факультет машиностроения, Государственный технический университет.

Салим Шейх Шахид. Доктор наук Лаборатория высокотемпературной трибологии, факультет машиностроения, Государственный технический университет.

Принятые обозначения

Символы	
h	коэффициент конвективной теплопередачи, Вт/м ² ·К
\bar{h}	средний коэффициент конвективной теплопередачи, Вт/м ² ·К
k	теплопроводность, Вт/м·К
Nu	число Нуссельта
\bar{Nu}	среднее число Нуссельта
Pr	число Прандтля
p	давление, Н/м ²
q	плотность теплового потока, Вт/м ²
Q	мощность источника тепла, Вт
D	радиус диска, м
r	локальный радиус, м
R	внешний радиус диска, м
R_a	осредненная шероховатость, м
Re	число Рейнольдса
Re_ω	число Рейнольдса при вращении
\bar{R}_{th}	тепловое сопротивление, К/Вт
T	температура, К
t	время, с
u, v, w	осредненные по времени скорости, м/с
x, y, z	оси опорной системы координат
U	средняя эталонная скорость, м/с
g	ускорение силы тяжести, 9,8 м/с ²
C_p	теплоемкость при постоянном давлении, Дж/К
C_v	теплоемкость при постоянном объеме, Дж/К
A	площадь, м ²
Сокращения	
$МГВД$	микрогироскопы на базе вращающегося диска
S_x	скорость вращения диска
Греческие символы	
ρ	плотность, кг/м ³
ω	угловая скорость, рад/с
ε	эффективность
μ	динамическая вязкость, Па·с
ν	кинематическая вязкость, м ² /с
τ	безразмерное время
Δ	приращение величины

Нижние индексы	
r	локальное радиальное расстояние, м
∞	окружающие условия
s	поверхность диска
ad	адиабатный
nf	наножидкость
f	жидкость
bf	базовая жидкость
p	частица
μ	микро

Введение

Полупроводниковые приборы лежат в основе современных электронных систем [1] и незаменимы во многих приложениях. Примером такого полупроводникового устройства с уникальными механическими функциональными свойствами является МГВД. Такие гироскопы применяются достаточно широко: производство инерциальных измерительных модулей (ИИМ), робототехника и автоматика, мониторинг состояния промышленного оборудования и конструкций, системы стабилизации, управления и навигации, предназначенные для летательных аппаратов, спутников, ракет, беспилотных космических аппаратов, автомобильного транспорта, а также системы позиционирования (под водой, в туннелях и т.д.). Они обеспечивают высокую точность и чувствительность, широкий динамический диапазон, универсальность применения, долговременную стабильность и робастность. При этом они реже задействуются в потребительской электронике по причине размеров, высокого энергопотребления и стоимости. Тем не менее следует отметить, что рынок потребительских технологий постоянно меняется, а значит, разработки МГВД продолжатся, а сфера их применения будет расширяться. Наше исследование представляет собой шаг в этом направлении, его задача состоит в усовершенствовании терморегулирования таких систем с целью их миниатюризации, что обеспечит их внедрение в потребительские электронные устройства.

Повсеместно средствами измерения параметров движения [2], стабилизации изображений [3] и управления игрой [4] оснащаются мобильные телефоны, планшеты, игровые приставки. Это стандартные функции, расширяющие возможности потребителей при использовании различных приложений. Датчики движения позволяют легко взаимодействовать с устройствами [5] и управлять ими при помощи жестов или действий. Наклоняете ли вы устройство, чтобы вести виртуальный автомобиль, или слегка щелкаете по телефону, дабы заглушить сигнал входящего вызова, – за удобство применения и «погруженность» отвечают сенсоры [6]. Стабилизация изображений необходима для получения высококачественных фото и видео даже в сложных условиях. При быстрой съемке на неровной дороге или записи непрерывного видео какого-либо активного момента стабилизация изображения обеспечивает четкий и качественный результат [7]. Функциями управления играми оснащаются мобильные телефоны, планшетные компьютеры и игровые приставки. Совершенствование сенсорных экранов, датчиков движения и специальных игровых контроллеров позволяет пользователям полностью погрузиться в игру и осуществлять точное управ-

ление действиями, будь то обычные игры на мобильном телефоне или иммерсивные симуляторы. Такие функции стали стандартными в потребительской электронике, что отражает запрос пользователей на простоту эксплуатации устройств и приложений и наличие эффекта погружения.

МГВД могут также найти практическое применение в других сферах, таких как автоматизация промышленного производства, здравоохранение (включая протезирование и контроль за состоянием пациентов), системы виртуальной и дополненной реальности, интеллектуальные электросети и мониторинг состояния инфраструктуры, морские, в том числе подводные, исследования, спорт и фитнес (включая трекееры активности, фитнес-браслеты и оборудование) [8, 9].

В [10] описывается скоростной МЭМС-датчик на основе вращающегося диска, оцениваются такие его характеристики, как чувствительность, нелинейность и разрешение. Рассматривается также коэффициент добротности, чтобы убедиться в отсутствии ухудшения работы и стабильности. В [11] авторы представили новый МГВД на основе тонкого диска π -типа с магнитной активацией. Решалась задача увеличения движущей силы, что в результате и было достигнуто – рост составил 150%.

Для улучшения тепловых характеристик различных систем задействуются разнообразные подходы – например, в МЭМС-системах в настоящее время широко используются виртуальные струи. В [12, 13] предлагается применять их для возмущения пограничного слоя, чтобы увеличить теплоотдачу в системе. Прежде всего теплообмен можно улучшить с помощью водного охлаждения. В [14] описывается гибридный фотоэлектрический модуль с автоматическим водяным охлаждением и зеркальными отражателями, который позволил улучшить тепловые характеристики на 21,6% по сравнению с обычным модулем, при этом максимальный КПД вырос на 61,5%. В [15] рассматривается новый метод воздействия на теплопередачу путем добавления съемных ребер к базовой геометрической структуре. Изменение скорости пульсирующего синусоидального потока значительно повлияло на усиление теплоотдачи. В [16] авторы задействовали нанонаполнители и оценили их воздействие на тепловые и другие свойства подложки. По сравнению с базовыми значениями тепловая стабильность, а также теплопроводность увеличились почти на 80%. В [17] наножидкости с различными наночастицами, в частности Al_2O_3 , применялись для улучшения характеристик холодильной установки. Были достигнуты многообещающие результаты в части улучшения тепловых характеристик и потенциала глобального потепления. В работах [18, 19] также показано, что наножидкости положительно влияют на тепловые характеристики различных систем и приложений. По сути, они представляют собой новые теплоносители, которые можно коммерчески использовать для повышения эффективности, производительности, а значит, и надежности систем.

На сегодняшний день МЭМС-технологии, включая гироскопические, достигли значительного прогресса, особенно в части проектирования конструкций, материалов подложек, электроники, методов разработки исполнительных устройств и полупроводниковых микросхем. Вместе с тем терморегулированию в таких МЭМС-системах уделяется немного внимания. Дальнейшие исследования в области терморегулирования МГВД будут способствовать их последующему усовершенствованию: уменьшению размеров, повышению стабильности и более длительному сроку службы. Целью настоящей статьи является заполнение лакун в сфере терморегулирования МГВД и изучение возможности их применения в потребительской электронике.

Методология

Математическое моделирование

МГВД – это сложное управляемое устройство, которое измеряет вращательное движение по принципу кинетического момента. Главный компонент прибора – это диск, изготовленный по МЭМС-технологии, который свободно вращается вокруг центральной оси на высоких скоростях и поддерживается системой микропружин или других гибких элементов. В нашем случае такая система подвеса отсутствует, поскольку рассматривается миниатюрный роторный гироскоп с жидкостным подвесом [20, 21]. Геометрическая конструкция гироскопа с миниатюрным ротором в жидкостном подвесе [22] была разработана с учетом характеристик подвеса и режимов течения. Изначально гироскоп приводится в действие при помощи электростатического, пьезоэлектрического или электромагнитного актюатора в зависимости от конструкции и приложений. В таких системах выработка тепла обусловлена главным образом запуском системы. Актюатор инициирует и поддерживает движение диска, создающее соответствующий кинетический момент, наличие которого и определяет способность гироскопа измерять угловое движение.

Когда МГВД обнаруживает внешнюю угловую скорость, он активирует вторичное движение диска, проявляющееся в виде смещения направления, ортогонального оси первичного вращения и оси приложенной внешней угловой скорости. Гироскоп оснащен чувствительным элементом для измерения этого смещения, которое для определения его амплитуды преобразуется посредством датчиков гироскопа в детектируемый электрический сигнал. Производится промежуточная обработка и фильтрация зарегистрированного электрического сигнала, чтобы на выходе получить количественно измеримую величину, которая прямо пропорциональна внешней вторичной угловой скорости. В этом заключается принцип работы МГВД.

Поскольку диск симметричен относительно оси z , 3D-модель можно упростить до осесимметричной 2D-модели, как показано на рис. 1. На рисунке также представлены все геометрические размеры, включая толщину диска 500 μm и радиус 3000 μm . Размеры емкости с жидкостью составляют 15×15 мм, чтобы эффективно имитировать бесконечную окружающую среду, обеспечивающую минимальное влияние на температуру жидкости при погружении в нее диска. Первоначально в емкость заливается вода, а затем уже наножидкости с частицами ZrO_2 концентраций 0,25%, 0,50%, 1% и 3%.

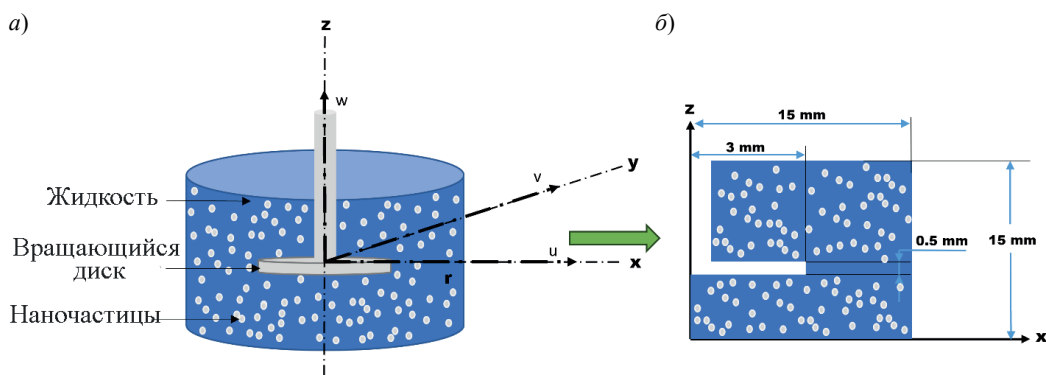


Рис. 1. Трехмерная (а) и двухмерная осесимметричная (б) модели

Расчеты и основные уравнения

Основные уравнения были приведены к дискретному виду с помощью метода конечных элементов *COMSOL Multiphysics*®. Начальные, граничные условия и допущения для анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Ограничения и условия при использовании метода конечных элементов

Условие	Значение
Поток	Ламинарный, двухмерный, несжимаемый
Плотность теплового потока	500 Вт/см ²
Температура жидкости ($t = 0$)	293,15 К
Контакт с твердой поверхностью	Прилипание
Свойства жидкости	Специальная
Приближение Буссинеска	Используется
Временная динамика	Зависит от времени
Временной шаг	0,1 с
Период оценивания	100 с
Теплопередача излучением	Не учитывается
Вязкое рассеяние	Не учитывается

Уравнение непрерывности (сохранения массы) для данного анализа имеет вид

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

Приведем уравнения Навье–Стокса, описывающие сохранение момента:

$$\rho_f \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_f \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

$$\rho_f \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_f \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

$$\rho_f \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu_f \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right). \quad (4)$$

Запишем уравнение сохранения энергии (4), описывающее процесс передачи тепла, следующим образом:

$$\rho_f C_{p,f} \left(u \frac{\partial T_f}{\partial x} + v \frac{\partial T_f}{\partial y} + w \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) = K_f \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial z^2} \right). \quad (5)$$

Включение дисперсных частиц в базовую жидкость меняет теплофизические характеристики полученной наножидкости. Они вычисляются с помощью приведенных ниже уравнений.

Теплофизические характеристики наножидкостей

В научной терминологии наножидкости – это жидкостные системы с равномерно и долговременно диспергированными наночастицами. Наножидкости объединяют свойства как базовых жидкостей, так и наночастиц и адаптируются для конкретных приложений. В настоящей работе в качестве базовой жидкости используется дистиллированная вода, в которую добавлены наночастицы ZrO_2 . Теплофизические характеристики базовой жидкости и наночастиц [23] приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Теплофизические свойства базовой жидкости и наночастиц

Свойство	Дистиллированная вода	Наночастицы ZrO_2
Теплопроводность, k (Вт/м·К)	0,613	1,7
Динамическая вязкость, μ (Н·с/м ²)	0,001003	–
Плотность, ρ (кг/м ³)	997,1	5680
Удельная теплоемкость, C_p (Дж/кг·К)	4179	420

На практике тепло непрерывно отводится от полупроводниковых устройств с помощью теплоотводов и вентиляторов, чтобы снизить колебания средней массовой температуры наножидкости. Таким образом, для целей приводимого анализа теплофизические параметры можно считать постоянными. Свойства наножидкостей обусловлены характеристиками базовой жидкости, в данном случае дистиллированной воды, а также свойствами и концентрацией используемых наночастиц. Плотность наножидкости [23] определяется уравнением

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (6)$$

Аналогично оптимальная теплоемкость наножидкости [23] равна

$$C_{P(nf)} = (1 - \phi)C_{P(bf)} + \phi C_{P(p)} \quad (7)$$

Оптимальная динамическая вязкость [23] определяется уравнением

$$\mu_{nf} = 1,22161 - 0,01803T + 0,19949\phi \quad (8)$$

Наконец, оптимальную теплопроводность [23] можно рассчитать по формуле

$$k_{nf} = 0,5349 + 0,00265T + 0,104057\phi.$$

В нашем исследовании теплопроводность и динамическая вязкость наножидкости при указанных концентрациях частиц полагаются температурно-зависимыми.

Обработка числовых данных

Число Нуссельта (Nu) – это безразмерный параметр, характеризующий относительную величину конвективной и кондуктивной теплопередачи в граничном слое. Число Нуссельта выражается с помощью коэффициента теплопередачи h для радиальных значений r :

$$Nu_r = \frac{h_r \cdot r}{k}, \quad (10)$$

где

$$h = \frac{q}{(T_s - T_\infty)}. \quad (10a)$$

Аналогичным образом осредненное значение \overline{Nu} равно

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h} \cdot R}{k}, \quad (11)$$

где

$$\overline{h} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} q \cdot r \cdot dr}{(r_2^2 - r_1^2)(T_s - T_{ad})}, \quad (12)$$

при этом

$$\overline{(T_s - T_{ad})} = \frac{2 \int_{r_1}^{r_2} (T_s - T_{ad}) \cdot r \cdot dr}{(r_2^2 - r_1^2)}. \quad (13)$$

Число Рейнольдса при вращении (Re_ω) – другой безразмерный параметр, характеризующий вращающийся поток жидкости. Он определяется как соотношение инерциальных и вязкостных сил во вращающейся системе:

$$Re_\omega = \frac{\rho \cdot \omega \cdot R^2}{\mu}. \quad (14)$$

Показатель эффективности означает, что коэффициент теплопередачи выше, чем у базовой жидкости. В процентном отношении его увеличение или уменьшение рассчитывается по формуле

$$P.I. = \frac{(h_{nf} - h_{bf})}{h_{bf}} \times 100. \quad (15)$$

Тепловое сопротивление (R_{th}) диска гироскопа определяется уравнением

$$R_{th} = \frac{|T_s|_{\max} - |T_s|_{\min}}{Q}. \quad (16)$$

Конечный элементный анализ

Чувствительность анализируется, чтобы оценить эффективность четырех задаваемых пользователем разрешений сетки в окружении наножидкости ($\phi = 0,2 - 1\%$). Разрешения сетки были определены в соответствии с количеством дискретизованных элементов в пространстве, как показано в табл. 3. Чтобы удостовериться в правильность выбранной сетки, моделирование проводилось многократно при угловых скоростях от 100 до 1000 рад/с.

Главная задача анализа состояла в том, чтобы добиться баланса между вычислительной эффективностью и точностью полученных результатов.

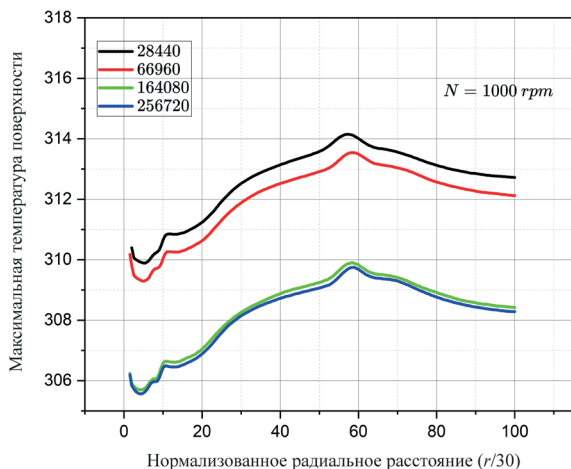


Рис. 2. Анализ чувствительности сетки

Построенный график максимальной температуры при различных радиусах диска позволяет оценить зависимость результатов от разрешения сетки при скорости 1000 об/мин. Как показано на рис. 2, мелкая сетка оказалась наиболее подходящей, так как обеспечила точные результаты при минимальных вычислительных ресурсах.

Таблица 3

Спецификация сетки

Спецификация	Количество элементов
Грубая	28440
Нормальная	66960
Мелкая	164080
Сверхмелкая	256720

Результаты и обсуждение

Валидация

В настоящем исследовании для валидации заданных условий сравнивались числа Нуссельта, полученные для воды при различных числах Рейнольдса, с корреляцией Дорфмана. Это делалось для того, чтобы оценить степень соответствия между результатами, полученными в настоящей работе, и корреляцией, предложенной Дорфманом [24]. Она оказалась высокой. Среднее отклонение по всем значениям числа Рейнольдса составило 6,18%. При исследовании отдельных точек данных максимальное отклонение – 10,53% – наблюдалось при числе Рейнольдса $1,8 \times 10^3$. Это подтверждает точность результатов исследования и надежность заданных условий.

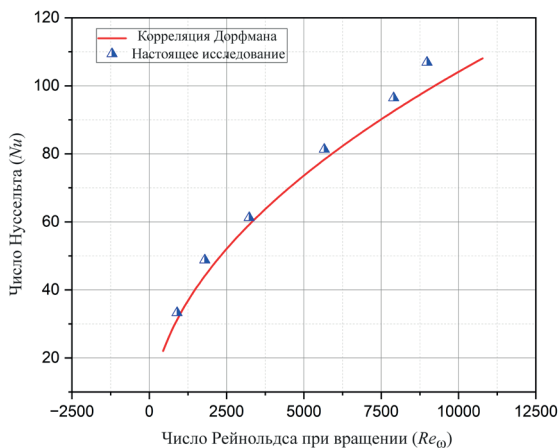


Рис. 3. Результаты эксперимента

Оценка эффективности

Влияние шероховатости поверхности диска

В работе использовались три степени шероховатости поверхности диска – 0,025, 0,05 и 0,1, чтобы исследовать влияние топологических модификаций на теплопере-

дачу от микродиска. Безразмерная форма шероховатости получается путем деления осредненной шероховатости (R_a) на радиус диска (r), умноженный на 1,5. Многочисленные расчеты показали, что степень шероховатости в минимальной степени влияла на усиление теплопередачи, причем при различных концентрациях наночастиц в рабочей жидкости и скоростях вращения диска. Это обусловлено двумя возможными причинами. Во-первых, шероховатость незначительно увеличивала площадь поверхности, что важно для теплопередачи. Во-вторых, текущая геометрия прибора не предусматривает переходный режим или режим турбулентности, при котором шероховатость обычно сильно влияет на теплопередачу за счет образования вихревых потоков и интенсивного смешивания и возмущения жидкости. Это связано с ограниченным размером задействованного в эксперименте диска.

Хотя многочисленные расчеты выявили незначительное влияние шероховатости на теплопередачу при различных концентрациях наночастиц в рабочей жидкости и скоростях вращения диска, следует отметить, что при шероховатости 0,1 число Нуссельта немного повысилось (на 0,31%) при скорости вращения 1000 рад/с и концентрации частиц 1,0%.

Показатель эффективности

Построены графики показателя эффективности в зависимости от скорости вращения диска, чтобы оценить влияние на теплоотдачу. В среднем при всех концентрациях наночастиц на скорости 100 рад/с (S1) показатель эффективности вырос примерно на 9,04%, а при скорости 200 рад/с (S2), 400 рад/с (S3) и 800 рад/с (S4) – на 15,47%, 16,75% и 19,08% соответственно. Максимальный рост при угловой скорости 1000 рад/с (S5) при всех пяти концентрациях наночастиц составил 26,21%.

Дополнительно при концентрации 0,4% средний показатель эффективности достиг 16,66%. Максимальный наблюдаемый рост при концентрации 1% и скорости 1000 рад/с составил 26,92%. На рис. 4 приведены значения показателя эффективности при всех пяти рассмотренных угловых скоростях и четырех различных концентрациях наночастиц.

Влияние на тепловое сопротивление

Термостойкость затрудняет теплоотдачу от окружающей жидкости. Как показали результаты исследования, улучшение тепловых характеристик за счет включения наночастиц в основном достигается путем снижения термостойкости системы. При любых значениях числа Рейнольдса и концентрации наночастиц 0,2% среднее тепловое сопротивление (R_{th}) снизилось на 4,98%, при концентрациях 0,4% и 0,6% – на 6,53% и 7,56% соответственно, а при концентрациях 0,8% и 1% – на 7,72% и 8,66%.

Важно отметить, что при увеличении концентрации наночастиц с 0,2% до 1,0% с шагом 0,2% тепловое сопротивление уменьшалось соответственно на 1,54%, 1,02%, 0,16% и 0,94%. Это показывает, что более низкие концентрации снижают его наиболее эффективно. Тем не менее, если рассматривать отдельные точки данных, можно заметить, что максимальное снижение R_{th} наблюдалось на уровне 12,89% при концентрации наночастиц 1,0% и числе Рейнольдса $8,93 \times 10^3$.

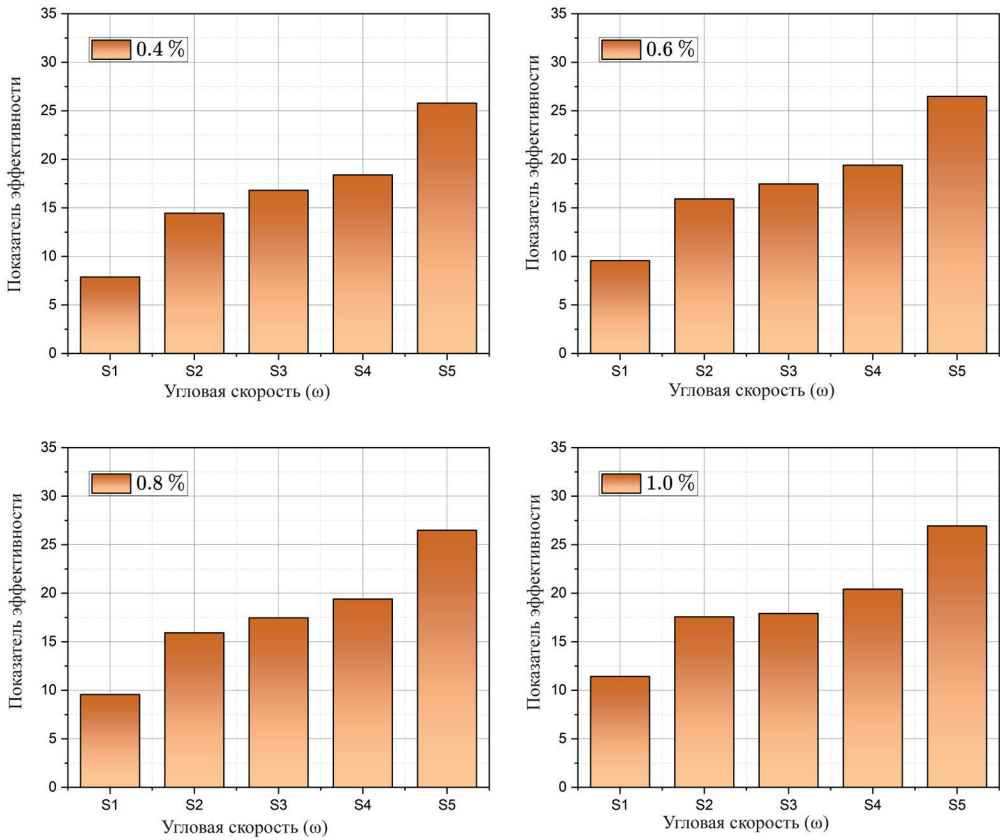


Рис. 4. Зависимость показателя эффективности от угловой скорости при разных концентрациях наночастиц

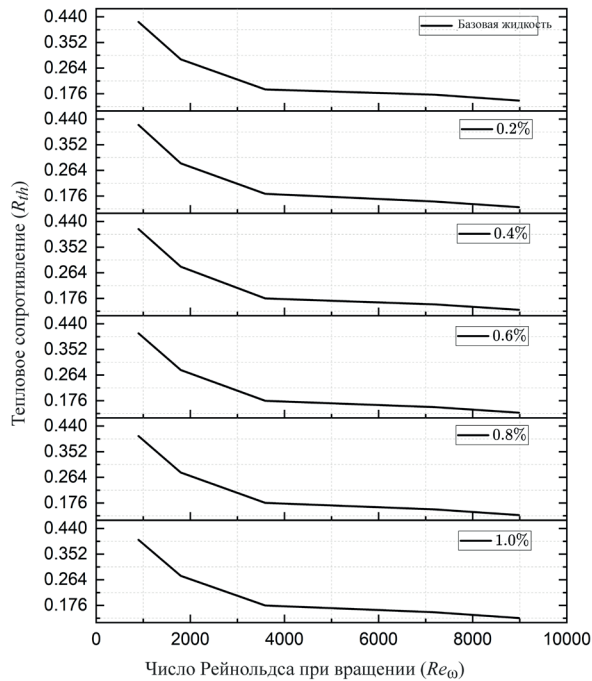


Рис. 5. Термостойкость при различных числах Рейнольдса и концентрациях наночастиц

Влияние на тепловой поток на поверхности

Из рис. 6 видно, что при увеличении концентрации наночастиц и скорости тепловой поток на поверхности диска уменьшается за счет более сильной теплоотдачи с поверхности диска.

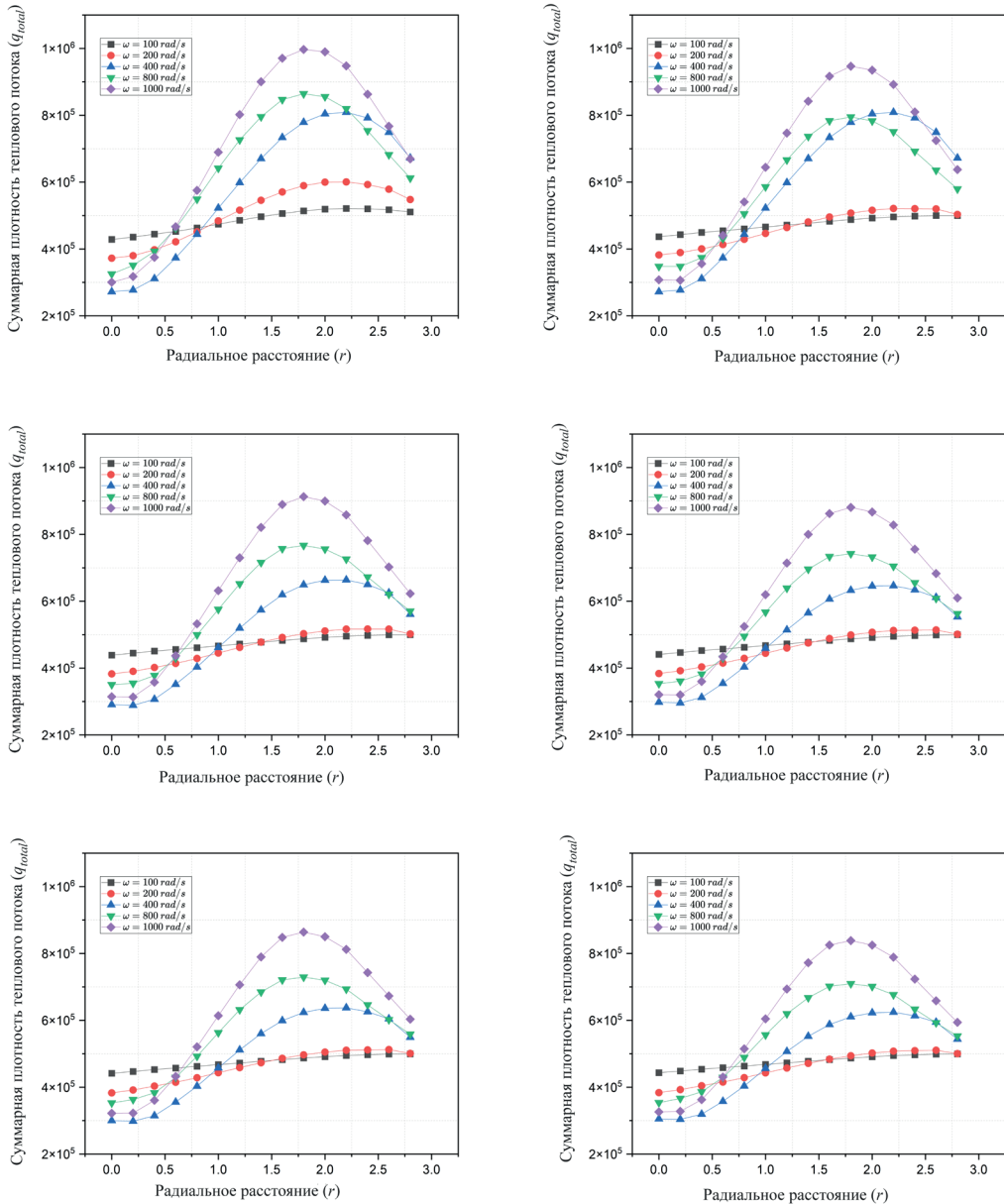


Рис. 6. Плотность теплового потока в зависимости от радиального расстояния q_{total}

Влияние угловой скорости

Увеличение скорости усиливает теплопередачу за счет обмена кинетическим моментом между твердой поверхностью и жидкой средой. Так, благодаря повышению

скорости диска с 100 до 1000 рад/с скорость теплоотдачи базовой жидкости возросла на 216,22%. Точно так же при концентрации наночастиц 0,2%, 0,4%, 0,6% и 0,8% увеличение скорости диска с 100 до 1000 рад/с улучшило теплоотдачу на 273%, 265%, 260% и 268% соответственно. На рис. 7 приведены результаты, полученные при применении наножидкостей и одновременном увеличении скорости.

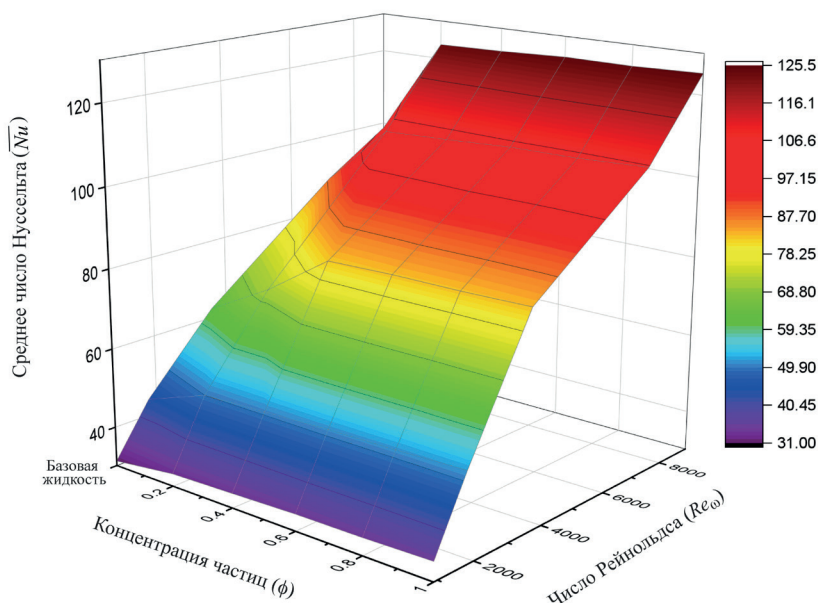


Рис. 7. Оптимальное число Нуссельта, полученное в результате использования наножидкостей разных концентраций и числа Рейнольдса

Таким образом, за счет более высоких скоростей повышается качество измерения параметров движения и управления в потребительской электронике и улучшается теплоотдача.

Выводы

В работе рассмотрено влияние наножидкостей и изменения шероховатости поверхности диска на различные параметры, определяющие тепловые характеристики МГВД. Можно сделать следующие выводы.

1. Шероховатость поверхности диска, в том числе применяемая вкупе с наножидкостями и различными скоростями вращения, оказывает незначительное влияние на тепловые характеристики гироскопа. Это в основном связано с ламинарным режимом потока и минимальным увеличением площади поверхности вследствие наведенной микрошероховатости.
2. Согласно показателю эффективности, теплоотдача от микродиска при использовании наночастиц значительно увеличилась. Максимальный рост составил 26,92% при концентрации наночастиц 1% и угловой скорости диска 1000 рад/с.
3. Термическое сопротивление внутри емкости значительно уменьшается при любых концентрациях наночастиц и угловых скоростях, при этом максимальное снижение составило 12,89% при концентрации 1,0%.

4. Увеличение скорости диска от 100 до 1000 рад/с повышает теплопередачу на 216,22%, 273%, 265%, 260% и 268% в зависимости от концентрации частиц.
5. Включение наночастиц в базовую жидкость усиливает теплоотдачу диска гироскопа.

Дальнейшие исследования

Применение наножидкостей в МГВД позволило получить многообещающие результаты при тепловых нагрузках более 500 Вт/м²: по сравнению со стандартной потребительской электроникой эффективность повысилась примерно в четыре раза. Соответственно, если снизить нагрузку, габариты системы потенциально можно уменьшить в два раза с перспективами дальнейшей миниатюризации. Кроме того, за счет меньших размеров система будет обладать более высокой плотностью энергии, что повысит ее стабильность и продлит срок службы. Таким образом, в статье показано, что МГВД могут заменить вибрационные гироскопы в потребительской электронике, поскольку обладают такими преимуществами, как повышенная чувствительность, большая точность, более высокая стабильность и более длительный срок службы. Перспективным направлением может стать изучение альтернативных наночастиц для аналогичных применений и проведение экономического анализа для сравнения затрат на производство популярных гироскопов и МГВД.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что никакие финансовые интересы или личные отношения не повлияли на результаты, представленные в этой статье.

Авторы не получали специальных грантов, гонораров или поддержки, которые могли бы поставить под вопрос объективность исследования.

Вклад авторов

Гаухар Шафи Бхат: разработка концепции, обзор литературы, теоретическое обоснование, формальный анализ, подготовка текста (рабочий вариант), методология, научно-исследовательская работа, курирование данных, валидация, эксперименты и расчеты, программное обеспечение, постобработка, отработка замечаний рецензентов.

Аднан Каюм: теоретическое обоснование, подготовка текста (проверка и редактирование), сопровождение проекта, контроль, ресурсы, отработка замечаний рецензентов.

Шейх Шахид Салим: теоретическое обоснование, подготовка текста (проверка и редактирование), сопровождение проекта, контроль, ресурсы, отработка замечаний рецензентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Rahman, M.A.**, A Review on Semiconductors Including Applications and Temperature Effects in Semiconductors. [Online]. Available: <http://asrjetsjournal.org/>.
2. **Zeng, H. and Zhao, Y.**, Sensing movement: Microsensors for body motion measurement, *Sensors*, 2011, vol. 11, no. 1. pp. 638–660, doi: 10.3390/s110100638.

3. **Li, T.-H. S. and Chen, C.-C.**, Extended Kalman filter based hand-shake detector for optical image stabilization using a low cost gyroscope, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2013, vol. 59, no. 1, pp. 113–121, doi: 10.1109/TCE.2013.6490249.
4. **Antonello, R. and Oboe, R.**, Exploring the Potential of MEMS Gyroscopes: Successfully Using Sensors in Typical Industrial Motion Control Applications, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2012, vol. 6, no. 1, pp. 14–24, doi: 10.1109/MIE.2012.2182832.
5. **Shan, C.**, Gesture Control for Consumer Electronics, *Multimedia Interaction and Intelligent User Interfaces: Principles, Methods and Applications*, C. and L. J. and E. M. Shao Ling and Shan, Ed., London: Springer London, 2010, pp. 107–128, doi: 10.1007/978-1-84996-507-1_5.
6. **Premaratne Prashan, S. and P. M., and Ajaz**, Hand Gesture Tracking and Recognition System for Control of Consumer Electronics, *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence*, Y. and G. P. and G. M. M. Huang De-Shuang and Gan, Ed., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 588–593.
7. **Moon, J.-H. and Jung, S.Y.**, Implementation of an image stabilization system for a small digital camera, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2008, vol. 54, no. 2, pp. 206–212, doi: 10.1109/TCE.2008.4560076.
8. **Zhanshe, G., Fucheng, C., Boyu, L., Le, C., Chao, L., and Ke, S.**, Research development of silicon MEMS gyroscopes: a review, *Microsystem Technologies*, Oct. 2015, vol. 21, no. 10, pp. 2053–2066, doi: 10.1007/s00542-015-2645-x.
9. **Passaro, V.M.N., Cuccovillo, A., Vaiani, L., De Carlo, M., and Campanella, C.E.**, Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective, *Sensors (Switzerland)*, 2017, vol. 17, no. 10. MDPI AG, Oct. 21, doi: 10.3390/s17102284.
10. **Tsai, N.C., Sue, C.Y., and Lin, C.C.**, Performance characterization of a decoupled tri-axis micro angular rate sensor, *Microsystem Technologies*, Feb. 2009, vol. 15, no. 2, pp. 235–249, doi: 10.1007/s00542-008-0657-5.
11. **Tsai, N.C., Liou, J.S., Lin, C.C., and Li, T.**, Design of micro-electromagnetic drive on reciprocally rotating disc used for micro-gyroscopes, *Sens Actuators A Phys*, Jan. 2010, vol. 157, no. 1, pp. 68–76, doi: 10.1016/j.sna.2009.10.019.
12. **Qayoum, A., Gupta, V., Panigrahi, P.K., and Muralidhar, K.**, Perturbation of a laminar boundary layer by a synthetic jet for heat transfer enhancement, *Int J Heat Mass Transf*, Nov. 2010, vol. 53, no. 23–24, pp. 5035–5057, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.061.
13. **Qayoum, A., Gupta, V., Panigrahi, P. K., and Muralidhar, K.**, Perturbation of a laminar boundary layer by a synthetic jet for heat transfer enhancement, *Int J Heat Mass Transf*, 2010, vol. 53, no. 23–24, pp. 5035–5057, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.061.
14. **Yadav, P., Singh, B., Subedar, Kumar, S., Singh, S. P., and Singh, S.K.**, Performance Enhancement of a Hybrid Solar Still/Photovoltaic System with Mirror Reflectors, Automatic Water Cooling, and Feed Water Preheating, *Russian Physics Journal*, Jan. 2024, vol. 67, no. 1, pp. 62–69, doi: 10.1007/s11182-024-03089-1.
15. **Sofi, A.Y. and Qayoum, A.**, Numerical Investigation of Thermo-Hydraulic Performance and Irreversibility Behaviour in a Pulsating Turbulent Flow Ribbed Duct, *Arab J Sci Eng*, 2024, vol. 49, no. 2, pp. 1515–1529, doi: 10.1007/s13369-023-07902-w.
16. **Singh, S.P. and Hirwani, C.K.**, Effect of Nano Filler on the Mechanical, Thermal, and Free Vibration Behavior of a Jute Polymer Composite, *Russian Physics Journal*, Jan. 2024, vol. 67, no. 1, pp. 55–61, doi: 10.1007/s11182-024-03088-2.
17. **Dilawar, M. and Qayoum, A.**, Performance evaluation of novel refrigerant mixtures in an air conditioning system using Al₂O₃ nanolubricant, *J Therm Anal Calorim*, 2023, vol. 148, no. 21, pp. 11929–11943, doi: 10.1007/s10973-023-12471-z.
18. **Kamran, M. and Qayoum, A.**, Effect of ZnO nanofluids on thermo-hydraulic characteristic of flow in a heated duct, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Dec. 2022, vol. 44, no. 4, pp. 10681–10693, doi: 10.1080/15567036.2022.2154871.
19. **Yousuf Bhat, A. and Qayoum, A.**, Performance enhancement of Photovoltaic-thermal system using hybrid tubes: An assessment of thermodynamic and thermohydraulic efficiencies, *Appl Therm Eng*, 2023, vol. 230, p. 120652, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120652>.
20. **Zhang, H., Chen, N., Liu, X., Yin, L., and Li, H.**, Optimised geometry model for liquid-suspended miniature gyroscope, *Micro Nano Lett*, 2014, vol. 9, no. 8, pp. 548–551, doi: 10.1049/mnl.2013.0660.
21. **Weng, R., Liu, X.W., and Zhang, H.F.**, Liquid-Suspended Rotor Gyroscope Multiphase Driving Technology, *Key Eng Mater*, 2013, vol. 562, pp. 296–301.

22. Wang, C., Feng, R., Chu, Y., Tan, Q., Xing, C., and Tang, F., Simulations of the Rotor-Stator-Cavity Flow in Liquid-Floating Rotor Micro Gyroscope, *Micromachines (Basel)*, Apr. 2023, vol. 14, no. 4, doi: 10.3390/mi14040793.
23. Syam Sundar, L., Experimental study on the thermophysical properties, heat transfer, thermal entropy generation and exergy efficiency of turbulent flow of ZrO_2 -water nanofluids, *Alexandria Engineering Journal*, Feb. 2023, vol. 65, pp. 867–885, doi: 10.1016/j.aej.2022.10.001.
24. Dorfman, L.A., Flow and heat transfer in a film of viscous liquid on a rotating disk, *Journal of Engineering Physics*, 1967, vol. 12, no. 3, pp. 162–166, doi: 10.1007/BF00829711.

Bhat, G.Sh., Qayoum, A. (Turbulence Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Srinagar, Hazratbal Srinagar, J&K, India), and **Saleem, Sh.Sh.** (High-Temperature Tribology Laboratory, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Srinagar, Hazratbal Srinagar J&K, India)
Effective Thermal Management of a MEMS Rotating Disk Gyroscope Utilizing ZrO_2 -Water Nanofluids and Surface Modifications for Consumer Electronics, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2024, vol. 32. no. 3, pp. 31–46.

Abstract. Micro rotating disk gyroscopes (μ RDGs) have emerged as a contender for replacing vibratory gyroscopes as crucial components in consumer electronics due to their high accuracy, precision, stability and wide dynamic range in motion sensing, image stabilisation, etc. However, effective thermal management remains a challenge in maximising their performance and reliability, especially at high heat loads, thus helping downsize μ RDGs and enabling them as a potential component in consumer electronics. This study investigates the potential of using nanofluids for thermal performance enhancement of μ RDGs. The research examines Zirconium dioxide nanoparticles dispersed in water as the base fluid. Five concentrations of ZrO_2 nanoparticles – 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1% – have been investigated. Moreover, the study incorporates five varying rotational speeds across all five concentrations. Additionally, surface roughness values of 0.025, 0.05 and 0.1, represented in dimensionless form, are examined in conjunction with the ensuing speeds and concentrations of nanoparticles. The utilisation of nanoparticles is observed to enhance the heat dissipation capability. Notably, at an angular velocity of 1000 rad/s and a nanoparticle concentration of 1%, the maximum enhancement in heat dissipation reaches approximately 27%. Surface roughness demonstrates minimal impact regardless of its values, with a maximum heat dissipation increase of 0.31%. Additionally, graphical representations of various performance indices are provided. The findings of this research indicate promising prospects for improving the thermal performance of μ RDGs by utilising nanofluids in conjunction with angular speeds at high heat loads of 500 W/cm², thus helping in the miniaturisation of these components for viable use in consumer electronics.

Key words: gyroscopes, rotating disk, MEMS, motion control, consumer electronics, thermal management.

Материал поступил 02.03.2024