

8. Atherton, D. L. Effect of stress on the magnetization of steel [Text] / D.L. Atherton, D.S. Jiles. – JEEE Trans. Magn. – 1983. – mag. 19. – vol. 5. – pp. 2012-2023.
9. Langman, R. A. The effect of stress on the magnetization of mild steel at moderate field strength [Text] / R.A. Langman. – JEEE Trans. Mag. – 1987. – vol. 21. – pp. 1314-1320.
10. Кулеев, В. Г. К проблеме контроля магнитного состояния ферромагнитных сталей при воздействии на них магнитных полей и упругих напряжений в зарэлеевской области [Текст] / В. Г. Кулеев, М. Н. Михеев, М. Б. Ригмант. – Дефектоскопия. – 1985. – №10. – С. 33-42.
11. Кулеев, В. Г. Исследование причин существенных различий величин коэрцитивной силы, остаточной намагниченности и начальной магнитной проницаемости ферромагнитных сталей в нагруженном состоянии при их пластическом растяжении [Текст] / В.Г. Кулеев, Т.П. Царькова, А.П. Ничипурук. – ФММ. – 2007. – т. 103. – №2. – С. 136-146.
12. Царькова, Т. П. Особенности магнитоупругого эффекта в пластически деформированных ферромагнитных сталях в слабых магнитных полях [Текст] / Т.П. Царькова, В. Г. Кулеев. – ФММ. – 2009. – т. 108. – №3. – С. 227-236.
13. Новиков, В.Ф. Закономерности магнитоупругого изменения локальной остаточной намагниченности сталей [Текст] / В.Ф. Новиков, В.Ф. Дягилев, М.С. Бахарев, В.В. Нассонов, В.В. Прилуцкий. – Заводская лабораторий. Диагностика материалов. – 2006. – т. 72. – №2. – С. 34-37.
14. Leng, Jiancheng. Characterization of the Elastic-plastic region based on magnetic memory effect [Text] / Leng Jiancheng, Xu Min-qiang, Li Jianwei, Zhang Jiazhong. – Chinese Journal of mechanical Engineering. – 2010. – vol. 23. – №4. – pp. 1-5.
15. Kinser, E. Modeling the interrelating effects of plastic deformation and stress on magnetic properties of materials [Text] / E. Kinser, D.S. Jiles. – Journal of Applied Physics. – 2003. – vol. 93(10). – pp. 626-628.

*Досліджено процеси, які проходять в мастильному середовищі у разі його взаємодії з магнітним полем. Встановлено, що відновлення в магнітному полі найбільш активно проходить з напрямком S-N-S-N та величиною магнітної індукції 0,3 Тл. Визначено, що за умов впливу магнітного поля (МП) на робоче середовище при терті товщина поверхневої плівки досягає 2,5...4,5 мкм*

*Ключові слова: магнітне поле, мащувальне середовище, мастило, тертя, зношування, відновлення, робочий зразок*

*Исследовано процессы, которые проходят в смазочной среде в случае её взаимодействия с магнитным полем. Установлено, что восстановление в магнитном поле наиболее активно проходит с направлением S-N-S-N и величиной магнитной индукции 0,3 Тл. Определенно, что при условиях влияния магнитного поля (МП) на рабочую среду при трении толщина поверхностной пленки достигает 2,5...4,5 мкм*

*Ключевые слова: магнитное поле, смазочная среда, масло, трение, изнашивание, восстановление, рабочий образец*

УДК 621.537.611

## МЕХАНІЗМ ВІДНОВЛЕННЯ ПОВЕРХНІ ТЕРТЯ ДІЄЮ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА РОБОЧЕ СЕРЕДОВИЩЕ МОДИФІКОВАНЕ ДІАМАГНЕТИКОМ

**М. М. Свирид**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: svirid\_mn@ukr.net

**І. Л. Трофімов**

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра екології\*\*

E-mail: troffi@ukr.net

**Л. Б. Приймак**

Кандидат технічних наук НАУ, аспірант\*

E-mail: Ludmila-joy@ukr.net

**В. Г. Паращанов**

Науковий співробітник, провідний фахівець

Кафедра безпеки життєдіяльності\*\*

\*Кафедра технологій виготовлення і

відновлення авіаційної техніки\*\*

\*\*Національний авіаційний університет

пр. Космонавта Комарова, 1, Київ, Україна 03058

E-mail: Ludmila-joy@ukr.net

### 1. Вступ

Дослідження, про які йдеться у статті, відносяться до галузі машинобудування. Розвиток машинобуду-

вання і умови експлуатації постійно удосконалюються, що збільшує питомі навантаження на деталі пар тертя. Значна частина машинного парку використовує механізми, які передають зусилля за допомогою гідравліч-

них систем, силовими агрегатами яких є гідронасоси, як плунжерні так і шестерінчасті.

## 2. Аналіз літературних джерел і постановка проблеми

Відновлення працездатності насосів займає багато часу і коштів та пов'язаним з цим простим машин. Саме тому на сьогодні актуально стратегію розвитку сервісного обслуговування направити на відновлення у процесі експлуатації. Враховуючи, що мастильне середовище, або робоче середовище входить до складу вузла тертя як третій елемент, необхідно враховувати його властивості і використовувати як відновник. Нами пропонується підвищення зносостійкості шляхом впливу на поверхню тертя постійним магнітним полем (МП) з використанням присадок до змащувальних матеріалів.

Механізм роботи магнітних оливи, що складаються з наночасток намагніченого металевого порошку, найближче відображає умови роботи вузла тертя в змащувальних середовищах і процеси зношування поверхонь під дією магнітних силових ліній [1 – 3].

Так як технологія відновлення трибологічної пари включає в себе взаємозв'язок робочого середовища з матеріалами (продукти зношування, модифікатори оливи), то в процесі тертя реалізуються мікромагнітні процеси в частинках продуктів зносу, які намагнічуються і моделюють властивості магнітної рідини, що складається з оливи і магнітних продуктів зносу.

Останнім часом все більша увага приділяється дослідженням впливу фізичних силових полів на робочі середовища, результати яких відображені в працях В.А. Аметова, І.А. Кравця, Є.М. Лисікова [4, 5] та ін. Вплив магнітного поля, в основному, спрямований на вдосконалення і інтенсифікацію процесів дії полем на середовища, і, зокрема, паливно-мастильні матеріали [6]. При цьому використовуються як постійне, так і змінне магнітне поле [7].

Таким чином, актуальність даного напрямку в роботі обумовлена використанням альтернативної енергії МП, що впливає на всі фізичні та хімічні системи оскільки вони мають розподілені заряди або їх модулі.

## 3. Мета і задачі дослідження

Метою даної роботи було вивчення механізму відновлення поверхонь тертя викликане зміною стану робочого середовища, обробкою його МП та модифікуючою діаманітною присадкою.

Об'єктом досліджень виступали процеси, що проходять в мастильному середовищі у разі його взаємодії із магнітним полем.

## 4. Методика проведення досліджень

Для проведення досліджень використано трибологічний комплекс [8], який допрацьований таким чином, що можливо переміщувати постійні магніти, утворюючи рівномірні та нерівномірні магнітні поля,

в залежності від розташування магнітів, що дозволяє обробляти робочу рідину в процесі тертя. При цьому на частинки матеріалу, що утворюються в процесі зношування поверхонь тертя діють магнітні силові лінії постійного магніту, який (або які) розміщені якнайдалі від площини тертя, щоб можливо було змінювати розташування полюсів та діяти на робоче середовище.

## 5. Експериментальні дані і їх обробка

У процесі тертя отримуємо продукти зносу, які неоднаково реагують на дію магнітного поля, що дає можливість спрямувати стан трибосистеми на зменшення ентропії, що підвищить умови відновлення поверхні.

Дослідження проводили при швидкостях 0,5 м/с, 1 м/с, навантаження змінювалося від 0,1 до 5 МПа. Зразок був виконаний із сталі 45, а контртіло із латунного сплаву ЛС59-1. У якості робочого середовища вибрано М10Г<sub>2к</sub> (мінеральну) та 5W-40 (синтетичну) моторні оливи, у якості модифікатора - діаманітний нанопорошок мідь. Направлення магнітного поля під час досліджень представлено на рис.1.

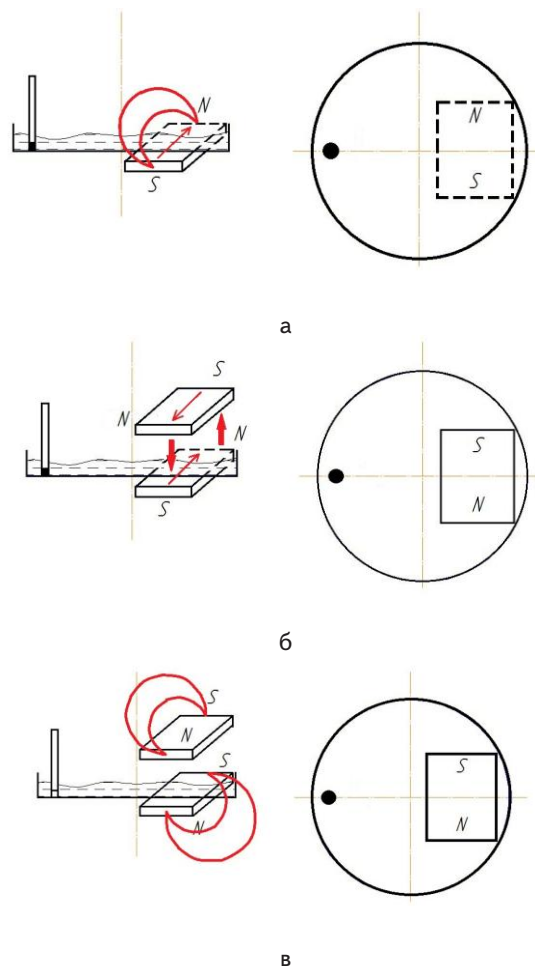


Рис. 1. Схеми розташування магнітного поля відносно змащувального середовища та поверхні тертя, темна точка вказує на зону тертя: а - магнітна індукція 0,15 Т; б - магнітна індукція 0,3 Т, (замкнута спрямована дія МП); в - магнітна індукція 0,3 Т, (різнонаправлена дія МП)

На рис. 1, а зображено розташування МП відносно зони тертя та мастильного матеріалу величиною магнітної індукції 0,15 Т; рис. 1, б – 0,3 Т, замкнutoї спрямованої дії МП; рис. 1, в – 0,3 Т різнонаправленої дії МП.

Як відомо, діаманетик зміщується стосовно МП в сторону негативного градієнта. Згідно логіки досліджень необхідно наситити мастило діаманетичною складовою. Виходячи з цього, використали модельний нанопорошок мідь (дисперсність якого 5-8 мкм) для визначення умов відновлення поверхні тертя сталі 45 шляхом додавання його у робоче середовище, а саме у склад мастила М10Г2к, та провели дослідження при різних напрямках магнітних ліній та величині магнітної індукції рис. 1, впливаючи дією МП виключно на робоче середовище.

Результати топографічних досліджень вказують на різні умови тертя і якості створених захисних плівок. На рис. 2 показано поверхню тертя сталі 45 по контртілу ЛС59-1 в оброблених магнітним полем середовищах М10Г2к і 5W40 з додаванням нанопорошку міді при різних напрямках магнітних ліній [9] та величині індукції.

Оскільки діаманетик має негативний градієнт стосовно густини магнітних ліній, то у випадку коли МП має S-N (0,15Тл), (рис.1, а) та S-N-S-N (0,3Тл), (рис.1, б) напрямки, діаманетик виноситься із зони дії магнітного поля в робоче середовище, але з різною силою. Таким чином при густині магнітного потоку 0,15Тл, мідь з зони впливу МП виноситься у мастильне середовище, приймаючи безпосередню участь у створенні захисних плівок на поверхні тертя (рис. 2, б, е), при цьому вони займають площу на рівні 15...20% та відновлюють поверхню тертя до рівня 1,8...3,5 мкм (рис. 3).

При збільшенні сили МП до 0,3Тл, збільшується площа покриття захисними плівками до 30...40% у мінеральній оливі (рис. 2, в) та до 20...25% у синтетичній (рис. 2, е). Проте і рівень відновлення досягає 2,5...4,5 мкм/км (рис. 2).

При напрямку МП S-S-N-N (рис. 1, в) на середовище мінеральної оливи М10Г2к (рис. 2, г) та синтетичної 5W40 (рис. 2, ж), поверхні тертя характеризуються наявністю захисних плівок на рівні 5...8%. Це пояснюється тим, що діаманетик мідь не переміщується через середовище у зону тертя, тому, що практично весь порошок міді знаходиться в зоні дії магнітного поля. Відповідно кількість міді для відновлення дуже мала, що й пояснює незначну кількість трибологічних плівок на поверхні тертя (рис. 2, г, ж). Відновлення у цьому випадку має найнижчий рівень 0,7...1,5 мкм (рис. 3).

Трибологічні дослідження без дії магнітного поля вказують на рівень відновлення до 2...3 мкм, що в незначній мірі відрізняється від впливу магнітного поля. Це пояснюється тим, що за умов відсутності впливу МП на робоче середовище діаманетик мідь рівномірно розміщується по об'єму оливи та потрапляє на поверхню тертя, де приймає участь у створенні захисних плівок. Поверхня в цьому випадку має значну наявність захисних плівок (рис. 2, а, б), які характеризуються різкими краями, що провокує їх розтріскування.

Таким чином, з представлених напрямків дії магнітних ліній (рис. 1) на середовище, можливо зробити висновок, що енергія магніту більш суттєво діє на модифікатори оливи ніж на його структурну складову (диполі). Напрямки магнітних ліній S-N значно зміню-

ють градієнт МП, що впливає на зміщення діаманетичної складової модифікуючої добавки в об'єм робочого середовища, збільшуючи при цьому його концентрацію в зоні тертя. Напрямок S-N-S-N крім доставки (за рахунок сили магнітного поля) діаманетичного модифікатора в зону тертя, вибудовує дипольну структуру оливи згідно дії електричного поля [10], що знижує рівень зношування поверхні, тому сумарна дія підвищує процес відновлення. Так на рис. 4 відображено хімічний аналіз поверхневої плівки робочого зразка із сталі 45 при дії магнітних ліній за напрямком S-N-S-N, який має однорідне МП в середині цугу і виштовхує з крайніх точок магніту діаманетичну складову.

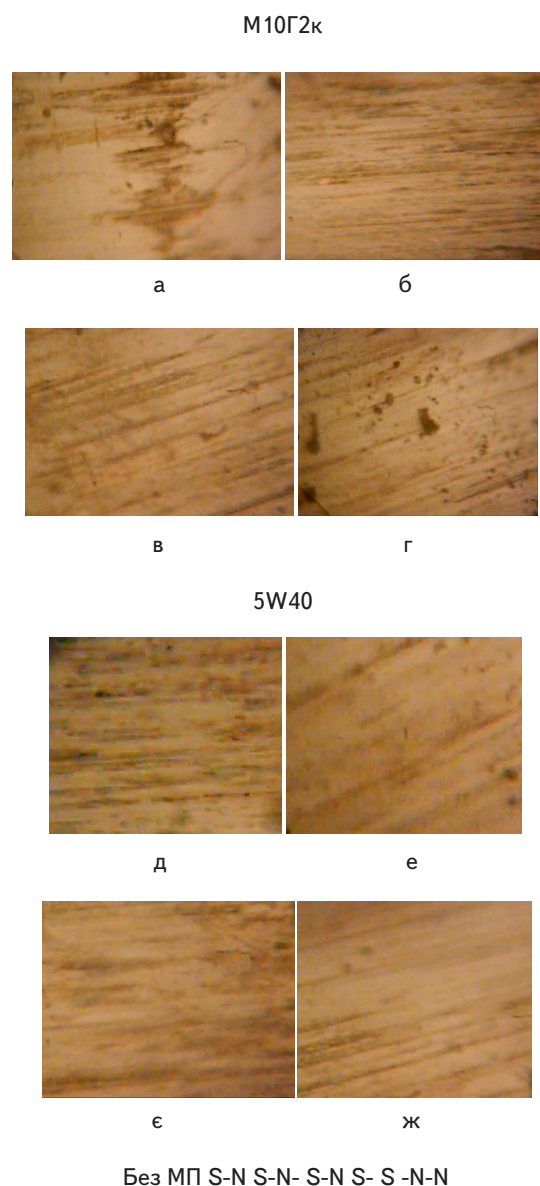
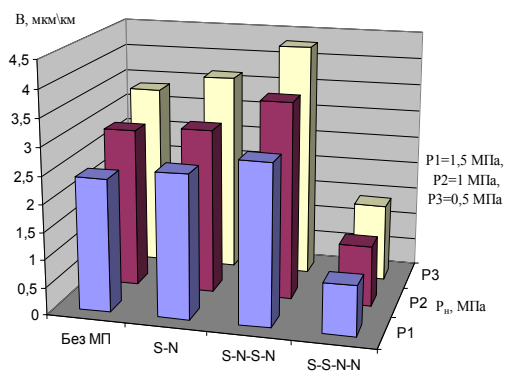
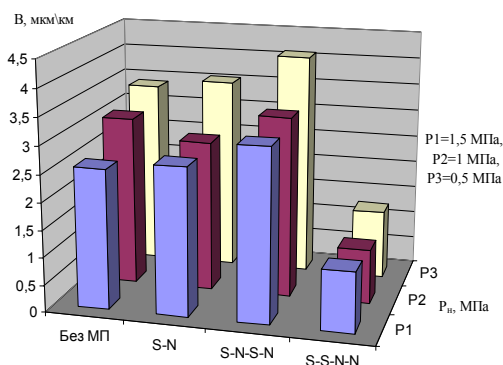


Рис. 2. Топографія поверхонь тертя зразків із сталі 45 по контртілу ЛС59-1 в оброблених магнітним полем середовищах оливи М10Г2к та 5W40 з додаванням нанопорошку міді при різних напрямках магнітних ліній та величині магнітної індукції: а, д – поверхня тертя без МП; б, е – магнітна індукція 0,15 Т з напрямком магнітних ліній вздовж робочої рідини; в, є – магнітна індукція 0,3 Т замкнута спрямована дія МП; г, ж – 0,3Т різнонаправлена дія МП



а



б

Рис. 3. Трибологічні параметри (нанесення на поверхню діамантної складової) феромагнетика сталі 45 по діамантному сплаву ЛС59-1 в середовищах: а - М10Г2к; б - 5W40 з додаванням порошку діаманетика міді, під дією МП, в залежності від навантаження

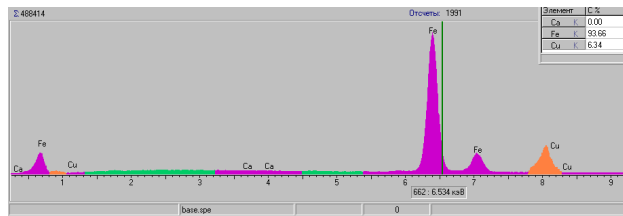


Рис. 4. Хімічний аналіз поверхньої плівки робочого зразка із сталі 45 при дії магнітних ліній на оливу М10Г2к за напрямком S-N-S-N

Виходячи з результатів хімічного аналізу, поверхня тертя характеризується наявністю міді у кількості 6,34%, що говорить про наявність нанопорошку міді саме при терті та про його активну участь у створенні поверхневих плівок при S-N-S-N напрямку магнітного поля. Направлення магнітних ліній S-S-N-N, що проходять через середовище не забезпечує сприятливого дипольного розміщення в мастильному середовищі та необхідного спрямування модифікатора, що в свою чергу провокує малу складову відновлення (рис. 3).

## 6. Висновки

Розглянуто механізм відновлення поверхні тертя дією магнітного поля на робоче середовище модифікованим діаманетиком та досліджено процеси, що проходять в оливах при взаємодії з магнітним полем. Встановлено, що відновлення в МП найбільш активно проходить з напрямком S-N-S-N та величиною магнітної індукції 0,3 Тл. Визначено, що у випадку використання діаманетика міді у складі мастильного середовища, за умов впливу на нього МП при терті, рівень відновлення складає 2,5...4,5 мкм. В ході досліджень з'ясовано, що розміщення диполів дією МП знижує рівень зношування на 30%, що дозволяє подовжити термін експлуатації плунжерних пар.

## Література

1. Белый, В.А. Трибология. Исследования и предложения: Опыт США и стран СНГ / Под ред. В. А. Белого, К. С. Лудемы, К. Н. Мышкина. – М.: Нью-Йорк, 1993. – 175 с.
2. Белый, А.В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А. В. Белый, Г. Д. Карпенко, К. Н. Мышкин. – М.: Машиностроение, 1991. – 45с.
3. Розман, Г.А. Строение и свойства вещества (учебное пособие). Изд. 2-е, переработанное. / Г. А. Розман. – Псков, изд-во ПГПИ, 2001. – 292 с.
4. Болотов, А.Н. Роль магнитного поля при трении поверхностей, смазываемых магнитным маслом / А. Н. Болотов, Н. В. Лочагин, Ю. О. Михалев // Трение и износ, 2010. – Т.9. – №5. – С. 870-877.
5. Лисіков, Є.М. Підвищення ресурсу трибосполучень технічних систем шляхом впливу електростатичного поля на мастильні матеріали / Є. М. Лисіков // Техніка та технологія виконання будівельних, колійних та перевантажувальних робіт на транспорті: Зб. наук. праць. Вип.58. – Харків: УкрДАЗТ, 2004. – С. 5-10.
6. Третьяков, И. Г. Влияние электромагнитной обработки на противозносные свойства индивидуальных углеводородных соединений. Вопросы авиационной химмотологии / И. Г. Третьяков, Ю. И. Короленко // Межвуз. сб., Вып.2. – Киев, 1978. – С.141-144.
7. Подгорков, В. В. Несущая способность магнитных жидкостей / В. В. Подгорков // Трение и износ. – 1990. – Т11. – №2. – С. 359-361.



8. Пат.70877 Україна. GO1N 3/56 Пристрій для дослідження поверхонь тертя в постійному рівномірному та нерівномірному магнітному полі / Свирид М.М., Кудрін А.П., Кравець І.А., Приймак Л.Б., Бородій В.М.; заявники і власники Національний авіаційний університет – № u2012 70877; заявл. 19.03.2012; опубл. 25.06.2012, Бюл. №14.
9. Свирид, М.Н. Трибологические параметры сталей в обработанных магнитным полем смазывающих материалах / М. Н. Свирид, А. П. Кудрин, Л. Б. Приймак // Проблемы трибологии. – 2012. – №1 – С. 22-24.
10. Ахматов, А. С. Молекулярная физика граничного трения [Текст]/ А. С. Ахматов. – М.: Физ. гиз., 1963. – 472 с.

*Представлено метод розрахунку магнітних полів, створених двома концентричними протилежно спрямованими круговими струмами. Чисельним знаходженням векторних криволінійних інтегралів знайдено поле в ближній зоні у площині паралельній площині витків. Наведено результати чисельних розрахунків розподілу поля вздовж прямої, розміщеної в цій площині*

*Ключові слова: круговий струм, магнітна індукція, поле кругового струму, векторний криволінійний інтеграл*

*Представлен метод расчета магнитных полей, создаваемых двумя концентрическими противоположно направленными кольцевыми токами, расположенными в одной плоскости. Численным нахождением векторных криволинейных интегралов найдено поле в ближней зоне в плоскости, параллельной плоскости витков. Приводятся результаты численных расчетов распределения поля вдоль прямой, расположенной в этой плоскости*

*Ключевые слова: круговой ток, магнитная индукция, поле кругового тока, векторный криволинейный интеграл*

УДК 621.317.4

## РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО ДВУМЯ КОНЦЕНТРИЧЕСКИМИ КРУГОВЫМИ ТОКАМИ

Л. Б. Лерман

Кандидат технических наук\*

E-mail: llerman@yandex.ua

Н. Г. Шкода

Кандидат физико-математических наук\*

E-mail: n\_shkoda@ukr.net

С. В. Шостак

Кандидат физико-математических наук

Национальный университет биоресурсов и

природопользования Украины

ул. Героев Оборона, 15, г. Киев, Украина, 03141

E-mail: shostakserg@ukr.net

\*Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко НАН Украины  
ул. Генерала Наумова, 17, г. Киев, Украина, 03164

### 1. Введение

Определение характеристик магнитного поля, создаваемого системой двух круговых концентрических токов, является актуальной задачей в связи с тем, что при разных направлениях движения тока в витках вдоль оси симметрии возникает локальная концентрация поля. Эти вопросы остаются недостаточно исследованными, в связи с чем возникает необходимость получения новых, достоверных количественных результатов. Не останавливаясь подробно на библиографическом обзоре, отметим, что основные расчетные формулы приведены в монографиях [1 – 2], а некоторые дополнительные аспекты нахождения магнитных полей сложных источников рассмотрены в [3 – 8].

В настоящей работе приводятся основные расчетные формулы, а также результаты численного расчета распределения магнитных полей, создаваемых такой системой. Эти результаты могут быть использованы

для удержания магнитных носителей лекарственных препаратов при магнитотерапии [9].

### 2. Постановка задачи

Рассматриваются два круговых витка различного радиуса с общим центром, расположенные в одной плоскости. Требуется определить магнитное поле, создаваемое витками, в плоскости, параллельной плоскости витков и проходящей через ось симметрии системы. При этом дополнительно предполагается, что поле в центре витков равно нулю, а расстояние до плоскости сравнимо с размерами витков, т.е. поле рассчитывается в ближней зоне.

Свяжем с витками декартовую прямоугольную систему координат  $x, y, z$ , поместив оси  $x, y$  в плоскости витков, и направив ось  $z$  перпендикулярно этой плоскости. Начало координат  $O$  поместим в центре концентрических окружностей. Также обозначим цен-