

DOI: 10.26693/jmbs03.07.191

УДК 616.314.28

Куцевляк В. И., Стариков В. В.

ОЦЕНКА СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ Nd-Fe-B ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ОРТОДОНТИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Харьковская медицинская академия последипломного образования, Украина

doctordentistortho@gmail.com

Применение аппаратов с магнитами для коррекции патологий прикуса в различных плоскостях является альтернативой классическому ортодонтическому лечению подростков и взрослых.

Цель исследования – создание установки для экспериментального измерения сил взаимодействия магнитов Nd-Fe-B различных размеров, разработка методики теоретического расчёта таких сил, сравнение полученных экспериментальных и теоретических оценок.

Использовались Nd-Fe-B постоянные магниты в форме прямоугольных параллелепипедов различных типоразмеров. Измерения силы производились при помощи специально собранной установки на базе аналитических весов, при этом за величину силы притяжения магнитов бралась сила отрыва двух магнитов, находящихся в притягивающей конфигурации. Кроме того, определялись величины сил взаимодействия магнитов при помощи выведенной математической модели.

Изготовлена установка и проведено измерение сил магнитного взаимодействия для магнитов разных типоразмеров. Предложена методика теоретических расчётов сил взаимодействия между магнитами в зависимости от расстояния между ними. Проведено сравнение оценок, измеренных экспериментально и рассчитанных магнитных сил. Обсуждается вопрос влияния противоположных грани магнитов.

Исследуемые магниты показали достаточный уровень сил, необходимый для ортодонтического перемещения зубов, возможен теоретический расчёт сил взаимодействия магнитов без проведения дополнительных экспериментов.

Ключевые слова: ортодонтия, перемещение зубов, магниты, силы магнитного взаимодействия.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Данная работа является фрагментом НИР «Патогенетические подходы к методам диагностики и лечения основных стоматологических заболеваний на основании изучения меха-

низмов заболеваний височно-нижнечелюстного сустава, аномалий развития челюстей и зубов, с использованием отечественных имплантатов», № гос. регистрации 0113U000975.

Введение. В настоящее время среди подростков и взрослых достаточно распространены являются аномалии прикуса и положения отдельных зубов. Наиболее часто ортодонтическое лечение таких пациентов проводится несъемными аппаратами – брекет-системами. Данное лечение является достаточно длительным (1,5–2 года) и требует тщательного соблюдения гигиены полости рта, тем более, что любая дополнительная конструкция только усложняет гигиену и увеличивает риск развития кариозного процесса. Эта проблема особенно актуальна для подростков, которые еще не выработали соответствующие навыки чистки зубов.

Существует и другой способ коррекции ортодонтических патологий – лечение пациентов с помощью аппаратов с магнитами [4, 7, 8, 10]. В этом случае существенно облегчается чистка зубов из-за упрощения конструкции аппарата, уменьшающей количество ретенционных пунктов для пищевых остатков. Кроме этого уменьшается количество посещений пациентом врача, сокращаются сроки лечения.

Первые аппараты с магнитами начали применять в стоматологии более 70 лет назад. В тот момент времени их использовали в качестве фиксирующих элементов для частичных зубных протезов, а позднее – для полных съемных и челюстно-лицевых протезов. Магниты в то время изготавливались из Al-Ni-Co или Pt-Co сплавов и имели достаточно большие размеры из-за невысокой величины силы магнитного взаимодействия, что делало невозможным их применение в ортодонтии.

В 80-е годы были разработаны и начали применяться магниты из редкоземельных металлов (Sm-Co, Nd-Fe-B), которые демонстрировали улучшенные свойства по сравнению со своими

предшественниками [1, 2, 15]. В результате интерес к использованию редкоземельных магнитов в качестве альтернативы традиционным фиксирующим элементам и системам, как при протезировании, так и при ортодонтическом лечении существенно расширился. Эти материалы обеспечивали существенно более высокую величину магнитных сил, что позволило применять магниты малых размеров, сопоставимых с размерами замков брекет-систем.

Аппараты с магнитами имеют следующие преимуществами перед брекет-системами: механика передачи сил без трения; предсказуемая величина действующей силы; отсутствие необходимости использования межчелюстных эластиков [6, 9, 11, 13, 14]. Следует также отметить, что современные магнитные материалы демонстрируют высокую стабильность физических свойств и не оказывают негативного влияния на организм человека [3, 5, 12].

Однако в настоящее время в научной литературе наблюдается дефицит информации по расчету величины сил, действующих в аппаратах с магнитами.

Цель работы: создание установки для экспериментального измерения сил взаимодействия магнитов Nd-Fe-B различных размеров, разработка методики теоретического расчёта таких сил, сравнение полученных экспериментальных и теоретических оценок.

Материал и методы исследования. В работе использовались постоянные магниты Nd-Fe-B в виде прямоугольных параллелепипедов с размерами $a \times b \times c$ (табл. 1).

Таблица 1 – Типоразмеры используемых магнитов Nd-Fe-B

Размеры магнитов			Количество, шт.
a, мм	b, мм	c, мм	
5	2	10	10
5	3	10	10
5	2	5	10

При измерениях магниты располагались на расстоянии (L) друг от друга так, чтобы вектора их намагниченностей M_1 и M_2 были сонаправлены, что обеспечивало максимальную силу их взаимодействия (рис. 1).

Практика показывает, что диапазон необходимых для перемещения зубов сил лежит в пределах 20–300 г. Необходимая точность измерения должна быть не хуже ± 2 г. Схема установки, предназначенной для измерения сил взаимодействия между магнитами, показана на рисунке 2.

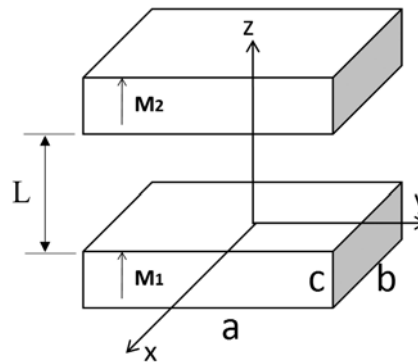


Рис. 1. Взаимное расположение магнитов

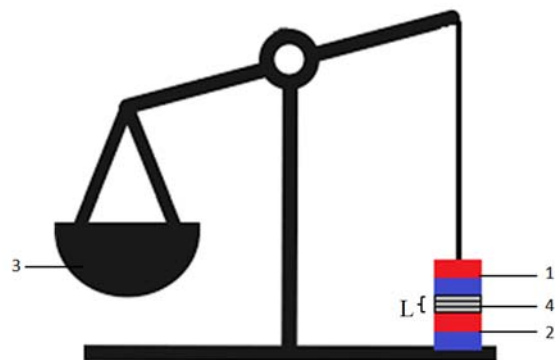


Рис. 2. Схема измерительной установки:

1, 2 – магниты; 3 – чашка противовеса; 4 – набор немагнитных прокладок

Устройство собрано на базе аналитических весов включало два магнита, один из которых прикреплен к плечу коромысла весов (1), а другой к неподвижной основе (2). При помещении грузика в чашку весов (3) возникала сила, отрывающая магниты друг от друга. Величина нагрузки, при которой происходил отрыв верхнего магнита, принималась за силу притяжения между магнитами. В измерении учитывался вес верхнего магнита. Каждое измерение повторялось 30 раз для набора необходимой статистики. Полученное значение силы, проверялось многократными повторными измерениями. Расстояние L между магнитами менялось с помощью набора плоских немагнитных пластин толщиной 1,4 мм (4).

Обработка экспериментально полученных данных проводилась с использованием распределения Стьюдента. Проведение кривых по экспериментальным точкам осуществлялось с использованием метода наименьших квадратов и сплайн-функций.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты измерений сил взаимодействия систем магнитов двух типоразмеров $5 \times 2 \times 10$ мм и $5 \times 3 \times 10$ мм представлены на рисунке 3.

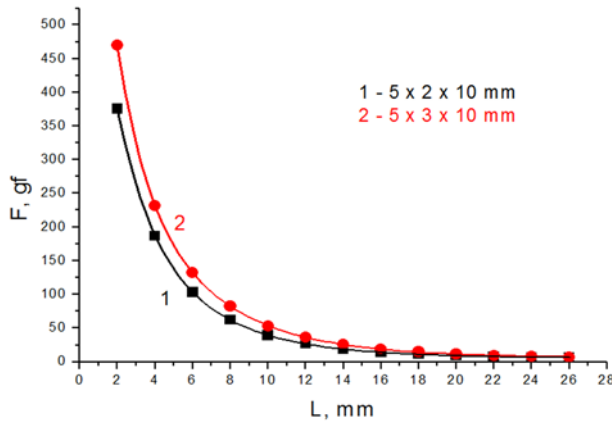


Рис. 3. Экспериментальное измерение сил взаимодействия F между магнитами в зависимости от расстояния между ними L

Из **рисунка 3** видно, что на дистанции 16 мм силы взаимодействия магнитов становятся недостаточными для эффективного перемещения зубов, причем их величина практически одинакова (< 16 Гс) даже для магнитов различных объемов. По мере сближения магнитов сила взаимодействия быстро возрастает и уже на дистанции 2 мм превышает значение 300 гс. Следовательно, диапазон дистанций для наиболее эффективного применения Nd-Fe-B магнитов в среднем составляет 2–12 мм.

При использовании магнитных систем других размеров необходимо предварительное экспериментальное получение градуировочной кривой, аналогичной приведённым на **рисунке 3**. Это позволит правильно рассчитать параметры создаваемой ортодонтической конструкции.

В работе также была сделана попытка теоретической оценки сил взаимодействия между магнитами без проведения экспериментальных исследований. Сложность такой задачи определяется тем, что не существует готового аналитического выражения для такого рода расчётов.

В общем виде сила взаимодействия между магнитами определяется выражением:

$$\vec{F} = \nabla Hz \cdot \vec{Ms}, \quad (1)$$

где ∇Hz – градиент магнитного поля вдоль оси z ; \vec{Ms} – намагниченность насыщения магнита (в нашем случае абсолютная величина Ms составляла 10^3 эрг·Гс $^{-1}$ ·см $^{-3}$).

Учитывая, что:

$$Hz = Ms \int_{-0,5b-0,5c}^{0,5b} \int_{-0,5b-0,5c}^{0,5c} \frac{z \, dx \, dy}{[(x-u)^2 + (y-v)^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}}, \quad (2)$$

окончательно получаем выражение для силы вдоль оси z :

$$F_z(L) = \int_{a+L}^{2a+L} \int_{-0,5b-0,5c}^{0,5b} \int_{-0,5b-0,5c}^{0,5c} \int_{-0,5b-0,5c}^{0,5b} \int_{-0,5b-0,5c}^{0,5c} M_s^2 \times \left[\frac{1}{\{(u-x)^2 + (v-y)^2 + z^2\}^{\frac{3}{2}}} - \frac{3z^2}{\{(u-x)^2 + (v-y)^2 + z^2\}^{\frac{5}{2}}} \right] \times dx dy du dv dz. \quad (3)$$

Теоретический расчёт силы взаимодействия между магнитами размерами $5 \times 2 \times 5$ мм в зависимости от расстояния между ними приведен на **рисунке 4**. Там же для сравнения приведены данные полученные экспериментальным путем для магнитов таких же размеров.

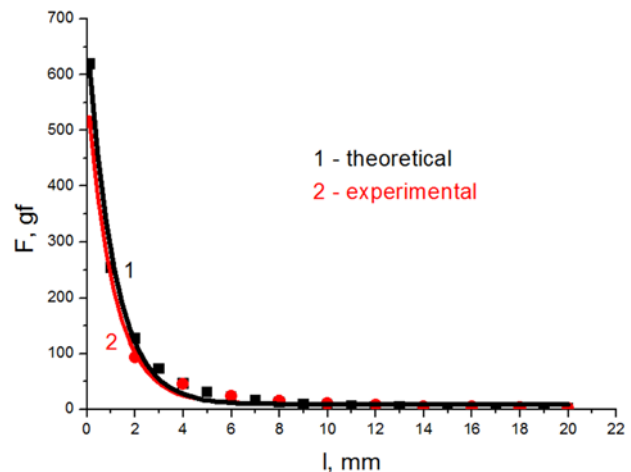


Рис. 4. Теоретический расчёт (кривая 1) и экспериментальное измерение силы взаимодействия F между магнитами Nd-Fe-B в зависимости от расстояния между ними L

Как видно из **рисунка 4**, приближения, принятые в расчётах, дали достаточно точную оценку сил магнитного взаимодействия (расхождение значений не более 15%). Следовательно, предложенные формулы позволяют в большинстве случаев исключить экспериментальную оценку сил магнитного взаимодействия, а проводить её только периодически для контроля параметров магнитных материалов.

Последний выбранный типоразмер магнитов ($5 \times 2 \times 5$ мм) в большинстве случаев позволяет решить все задачи, связанные с разработкой и изготовлением ортодонтических систем. Однако в некоторых случаях может потребоваться дополнительная миниатюризация магнитов. Это может

привести к тому, что противоположные стороны магнита, имея намагниченности разных знаков, будут ослаблять друг друга, снижая силу магнитного взаимодействия. Применяя унифицированную процедуру определения сил взаимодействия магнитов с помощью предложенной математической модели, была рассчитана сила взаимодействия между магнитами $5 \times 2 \times 10$ мм при фиксированной дистанции между ними $L = 1$ мм в случае если теоретически уменьшать размер s одного из магнитов (рис. 5).

Расчётная кривая показывает незначительное уменьшение силы взаимодействия между магнитами при уменьшении s до 5 мм. При дальнейшем уменьшении толщины магнита, особенно после значения $s = 3$ мм, значение силы резко снижается, что необходимо учитывать при выборе магнитов и изготовлении ортодонтических конструкций.

Выводы. Полученные в работе экспериментальные данные по определению сил взаимодействия между магнитами Nd-Fe-B показали, что современные материаловедческие технологии позволяют изготавливать магниты требуемых размеров, сопоставимых с размерами замков брекет-систем, обеспечивающие необходимые величины сил для различных перемещений зубов при коррекции прикуса. Для экспериментального определения величины таких сил была собрана установка, позволившая получить градуировочные кривые для магнитов различных размеров. Предложенная методика теоретической оценки сил взаимодействия между магнитами показала хорошую корреляцию (не хуже 15%) с экспериментальными данными, что даёт возможность конструирования орто-

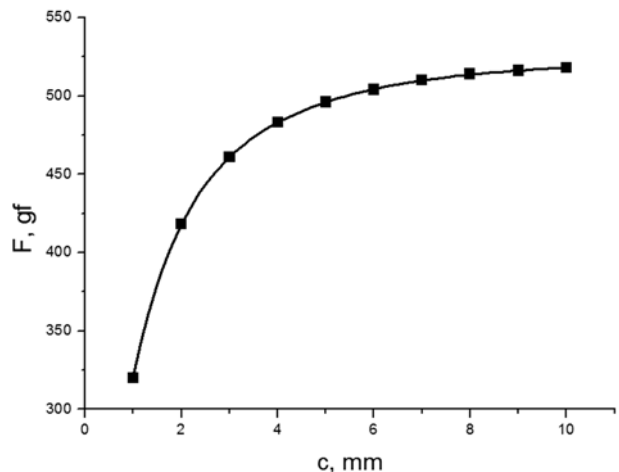


Рис. 5. Теоретический расчёт силы взаимодействия F между магнитами при уменьшении размера s и фиксированном L

донтических систем без дополнительных экспериментальных исследований. Общий подход к данной проблеме позволил учесть возможное снижение сил межмагнитного взаимодействия при существенном уменьшении размеров магнитов.

Перспективы дальнейших исследований.

Планируется дальнейшее изучение сил взаимодействия магнитов, в частности при их начальном положении не вдоль осей намагничивания, а с наличием угла наклона. Кроме того, представляет интерес изучение сил взаимодействия множественных магнитов. Предполагается разработка экспресс методики оценки сил межмагнитного взаимодействия при помощи портативного прибора.

References

1. Korol MD, Korol DM, Golovko NV, et al. Zastosuvannya samarij-kobaltovykh magnitiv u znimnomu ta neznimnomu zubnomu protezuvanni. *Oglyad literatury. Novyny stomatologiyi*. 2008; 1(54): 53–5. [Ukrainian]
2. Markov BP. Fyksatsyya protezov na bezzubykh chelyustyakh. *Zubnoy tekhnok*. 2001; 4: 29–31. [Russian]
3. Bondemark L, Kuroi J, Larsson A. Human dental pulp and gingival tissue after static magnetic field exposure. *European Journal of Orthodontics*. 1995; 17: 85–91. DOI: 10.1093/ejo/17.2.85
4. Prasad M, Manoj-Kumar M, Gowri-Sankar S, Chaitanya N, Vivek-Reddy G, Venkatesh N. Clinical evaluation of neodymium-iron-boron (Ne2Fe14B) rare earth magnets in the treatment of mid line diastemas. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*. 2016; 8: 164–71. DOI:10.4317/jced.52352
5. Darendeliler MA, Darendeliler A, Mandurino M. Clinical application of magnets in orthodontics and biological implications: a review. *Eur J Orthod*. 1997; 19: 431–42. PMID: 9308264. <https://doi.org/10.1093/ejo/19.4.431>
6. Doshi UH, Bhad-Patil WA. Early management of skeletal open bite with spring-loaded and magnetic bite blocks. *World Journal of Orthodontics*. 2010; 11: 107–16. PMID: 20552096
7. Tomizukaa R, Kanetakab H, Shimizuc Y, Suzuki A, Igarashi K, Mitani H. Effects of Gradually Increasing Force Generated by Permanent Rare Earth Magnets for Orthodontic Tooth Movement. *Angle Orthodontist*. 2006; 6: 1004–9. <https://doi.org/10.2319/071805-237>
8. Li LC, Wong RW, King NM. Orthodontic traction of impacted canine using magnet: a case report. *Cases Journal*. 2008; 10(1): 382. PMID: 19068138. PMCID: PMC2614941. DOI: 10.1186/1757-1626-1-382
9. Zhao N, Feng J, Hu Z, Chen R, Shen G. Effects of a novel magnetic orthopedic appliance (MOA-III) on the dentofacial complex in mild to moderate skeletal class III children. *Head & Face Medicine*. 2015; 11(Issue 34). Available from: <https://head-face-med.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13005-015-0092-7>. <https://doi.org/10.1186/s13005-015-0092-7>

10. Noar JH, Evans RD. Rare earth magnets in orthodontics: an overview. *Br J Orthod.* 1999; 26L 29-37. PMID: 10333885. DOI: 10.1093/ortho/26.1.29
11. Yüksel S, Kaygisiz E, Ulusoy Ç, Keykubat A. Post-treatment evaluation of a magnetic activator device in Class II high-angle malocclusions. *European Journal of Orthodontics.* 2010; 32: 425–9. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjp120>
12. Saygili G, Aydinlik E, Ercan MT, Naldoken S, Ulutuncel N. Investigation of the effect of magnetic retention systems used in prostheses on buccal mucosal blood flow. *International Journal of Prosthodontics.* 1992; 5: 326-32. PMID:1520454
13. Phelan A, Tarraf N, Taylor P, Hönscheid R, Drescher D, Baccetti T, Darendeliler MA. Skeletal and dental outcomes of a new magnetic functional appliance, the Sydney Magnoglide, in Class II correction. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics.* 2012; 6: 759–72. PMID: 22640678. DOI: 10.1016/j.ajodo.2012.01.014
14. Li Y, Yang P, Fan X, Wang J, Liu J, Zhao Z, Zhao M. Static magnetic field combined with functional appliances: A new approach to enhance mandibular growth in Class II malocclusion. *Medical Hypotheses.* 2009; 72(3): 276–9. PMID: 19062200. DOI: 10.1016/j.mehy.2008.08.029
15. Sharma N, Shrivastav S, Kamble RH, Sharma P. The Use of Magnets in Orthodontics. *World Journal of Dentistry.* 2015; 1: 45–8. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10015-1311>

УДК 616.314.28

ОЦІНКА СИЛИ ВЗАЄМОДІЇ Nd-Fe-B ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ В ОРТОДОНТИЧНИХ АПАРАТАХ

Куцевляк В. І., Старіков В. В.

Резюме. Застосування апаратів з магнітами для корекції патологій прикусу в різних площинах є альтернативою класичному ортодонтичному лікуванню підлітків і дорослих.

Мета – створення установки для експериментального вимірювання сил взаємодії магнітів Nd-Fe-B різних розмірів, розробка методики теоретичного розрахунку таких сил, порівняння отриманих експериментальних і теоретичних оцінок.

Матеріали і методи. Використовувалися Nd-Fe-B постійні магніти у формі прямокутних паралелепіпедів різних типорозмірів. Вимірювання сили проводилися за допомогою спеціально зібраній установки на базі аналітичних ваг, при цьому за величину сили тяжіння магнітів бралася сила відриву двох магнітів, які перебували в притягуючій конфігурації. Крім того, визначалися величини сил взаємодії магнітів за допомогою виведеної математичної моделі.

Результати. Виготовлена установка і проведено вимірювання сил магнітної взаємодії для магнітів різних типорозмірів. Запропоновано методику теоретичних розрахунків сил взаємодії між магнітами в залежності від відстані між ними. Проведено порівняння оцінок магнітних сил, що були виміряні експериментально і розраховані теоретично. Обговорюється питання впливу протилежних граней магнітів.

Висновки. Досліджувані магніти показали достатній рівень сил, необхідний для ортодонтичного переміщення зубів, можливий теоретичний розрахунок сил взаємодії магнітів без проведення додаткових експериментів.

Ключові слова: ортодонція, переміщення зубів, магніти, сили магнітного взаємодії.

UDC 616.314.28

Evaluation of the Interaction Force of Nd-Fe-B Permanent Magnets Used in Orthodontic Devices

Kutsevliak V. I., Starikov V. V.

Abstract. The use of devices with magnets for the correction of different malocclusions is an alternative to orthodontic treatment of teenagers and adults. In this case, tooth brushing is greatly facilitated due to the simplification of the apparatus design, which reduces the number of retention points for food residues. The number of patient visits to the doctor decreases and treatment time is reduced too. Devices with magnets have the following advantages over bracket systems: mechanics of force transfer without friction; predictable magnitude of the acting force; not required usage of maxillary elastics.

The purpose of the study was to create a device for experimental measurement of interaction forces of Nd-Fe-B magnets of various sizes, the development of a methodology for the theoretical calculation of such forces, and comparison of the experimental and theoretical estimates.

Material and methods. In the study we used Nd-Fe-B permanent magnets in the form of cuboids of various sizes. The force measurements were carried out using the specially assembled device based on analytical weights. The magnitude of interaction force between magnets was determined at separation of two magnets in the attracting configuration. Additionally, the magnitudes of magnets interaction force were calculated using the derived mathematical model.

Results and discussion. We made up the device for experimental measurement of interaction forces of Nd-Fe-B magnets and carried out the measurement of the magnetic interaction forces for magnets of different sizes. For this purpose we proposed a method of theoretical calculations of the interaction forces between the magnets depending on the distance between them. We compared the magnetic force estimates measured experimentally and calculated. The influence of the opposite faces of the magnets was discussed.

Conclusions. Estimation of the interaction forces between Nd-Fe-B magnets showed that modern materials science technologies made it possible to produce magnets of the required sizes comparable to the sizes of braces systems locks, providing the necessary forces for various movements of the teeth during occlusion correction. For experimental determination of such forces magnitude the device was assembled that allowed obtaining calibration curves for magnets of various sizes. The proposed theoretical method of calculation the interaction forces between the magnets showed a good correlation (not worse than 15%) with experimental data, which allowed designing orthodontic systems without additional experimental studies.

Keywords: orthodontics, tooth movement, magnets, magnetic interaction forces.

The authors of this study confirm that the research and publication of the results were not associated with any conflicts regarding commercial or financial relations, relations with organizations and/or individuals who may have been related to the study, and interrelations of coauthors of the article.

Стаття надійшла 17.08.2018 р.

Рекомендована до друку на засіданні редакційної колегії після рецензування