

# ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ УЧАЩИХСЯ ПО ТЕМЕ “ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ В СВЯЗАННЫХ СИСТЕМАХ”

Выполнила: Курникова С.В.

рук: Орлов В.А., к.ф.-м.н.

## Цели:

- ▶ 1. Исследовать особенности коллективного движения связанных систем с различающимися параметрами.
- ▶ 2. Исследовать возможность включения темы о связанных колебаниях в содержание факультативных занятий по физике в профильной школе.

## Задачи:

- ▶ 1) Построить кривые поглощения для системы двух упруго связанных осцилляторов с различными собственными частотами и параметрами затухания. Выяснить влияние различия этих параметров на различные свойства.
- ▶ 2) Выяснить спектр частот (дисперсионные задачи) двухслойной системы взаимодействующих ферромагнитных нанодисков. Взаимодействие носит магнитостатический характер. Исследовать влияние величины межслойного взаимодействия и сочетания полярностей/хиральностей на резонансные частоты.

## Глава II. Особенности резонанса в системах двух связанных осцилляторов:

---

Уравнение движения:



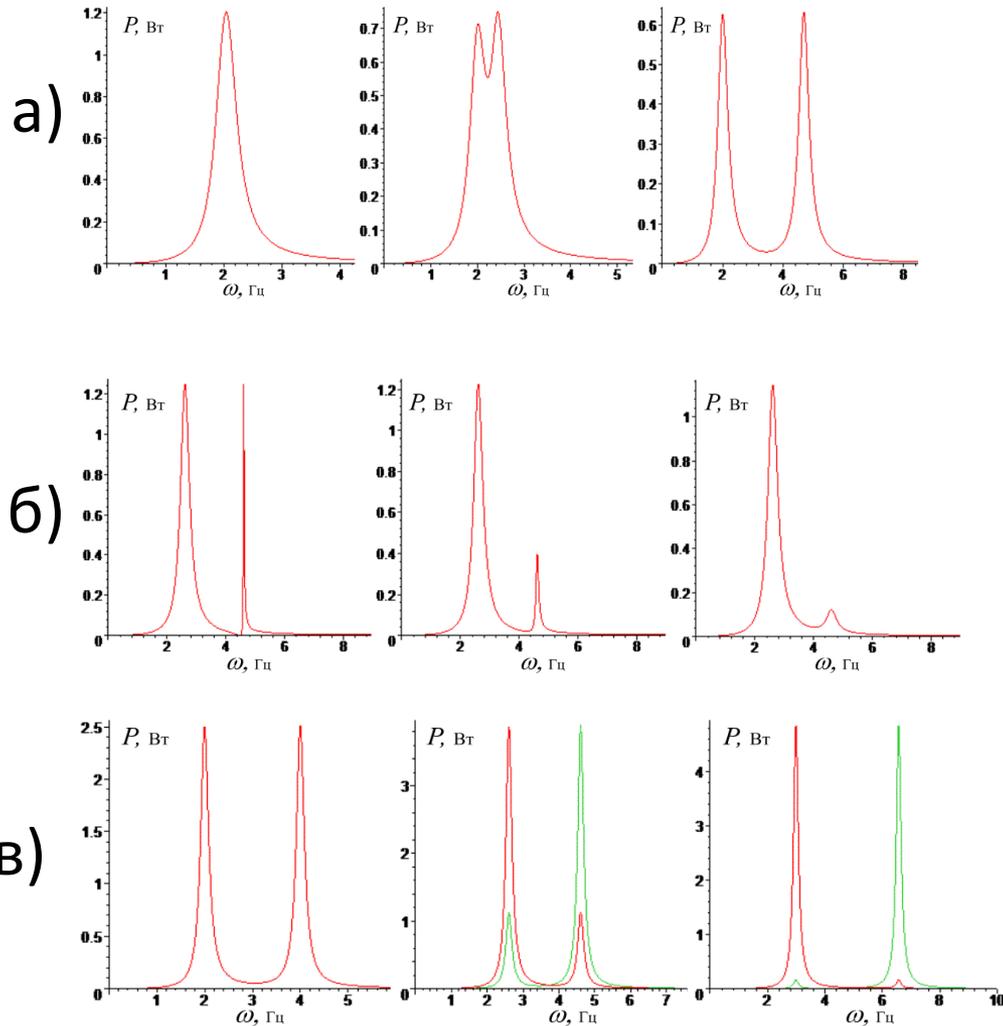
$$\begin{cases} m_1 \mathbf{a}_1 = \mathbf{f}_{\text{упр1}} + \mathbf{f}_{\text{св}}^{(1)} + \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_{\text{тр1}}, \\ m_2 \mathbf{a}_2 = \mathbf{f}_{\text{упр2}} + \mathbf{f}_{\text{св}}^{(2)} + \mathbf{f}_2 + \mathbf{f}_{\text{тр2}}. \end{cases}$$

Решения для амплитуд:

$$\begin{cases} x_{01} = e^{-i\varphi_1} \frac{f_{01}(\omega_{02}^2 + \varkappa_2^2 - \omega^2 + 2\lambda_2 i\omega) + f_{02} \varkappa_{01}^2}{(\omega_{01}^2 + \varkappa_1^2 - \omega^2 + 2\lambda_1 i\omega)(\omega_{02}^2 + \varkappa_2^2 - \omega^2 + 2\lambda_2 i\omega) - \varkappa_{01}^2 x_{02} e^{i\varphi_2}}, \\ x_{02} = e^{-i\varphi_2} \frac{f_{02}(\omega_{01}^2 + \varkappa_1^2 - \omega^2 + 2\lambda_1 i\omega) + f_{01} \varkappa_{02}^2}{(\omega_{01}^2 + \varkappa_1^2 - \omega^2 + 2\lambda_1 i\omega)(\omega_{02}^2 + \varkappa_2^2 - \omega^2 + 2\lambda_2 i\omega) - \varkappa_{01}^2 x_{02} e^{i\varphi_2}}. \end{cases}$$



## Некоторые частные случаи:



а) Вынуждающая сила действует только на один осциллятор, при этом  $\alpha_1 = \alpha_2$   $\omega_{02} = 2\omega_{01}$   $\lambda_1 = \lambda_2$  при различных  $\alpha$

б) Вынуждающая сила действует только на один осциллятор, при этом  $\alpha_1 = \alpha_2$   $\omega_{02} = 2\omega_{01}$  при различных  $\lambda_2$

в) Вынужденная сила действует на оба осциллятора, при этом  $\lambda_1 = \lambda_2$  при различных  $\alpha$



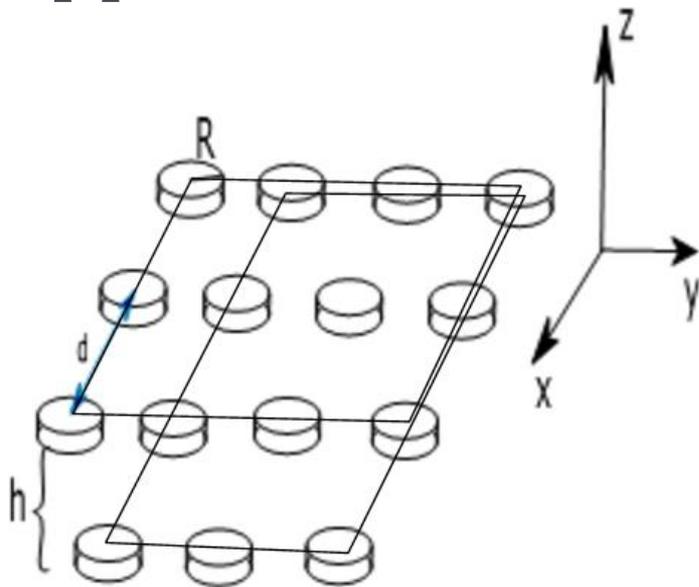
## Выводы ко II части:

---

- ▶ При увеличении жесткости связи наблюдается явление снятия вырождения резонансной частоты;
- ▶ При увеличении параметра затухания выраженность второй частоты уменьшается;
- ▶ При увеличении жесткости связи вторая мода становится менее выражена и вовсе исчезает.



# Глава III. Двухслойный массив ферромагнитных нанодисков:



2D-решетка,  
состоящая из двух  
слоев дипольно-  
взаимодействующих  
дисков.

Для изолированного диска  
используем уравнение Тила:

$$\hat{\mathbf{G}} \times \mathbf{v} + \nabla U + \mathbf{f} = \mathbf{0};$$

В силу  $\mathbf{f}$  следует включить  
междисковое взаимодействие.

# Междисковое взаимодействие:

---

Энергия взаимодействия между дисками с индексами  $(n,m)$  и  $(i,j)$ :

$$W_{nmij} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{\mathbf{M}_{nm}\mathbf{M}_{ij}}{r^3} - 3 \frac{(\mathbf{rM}_{nm})(\mathbf{rM}_{ij})}{r^5} \right]$$

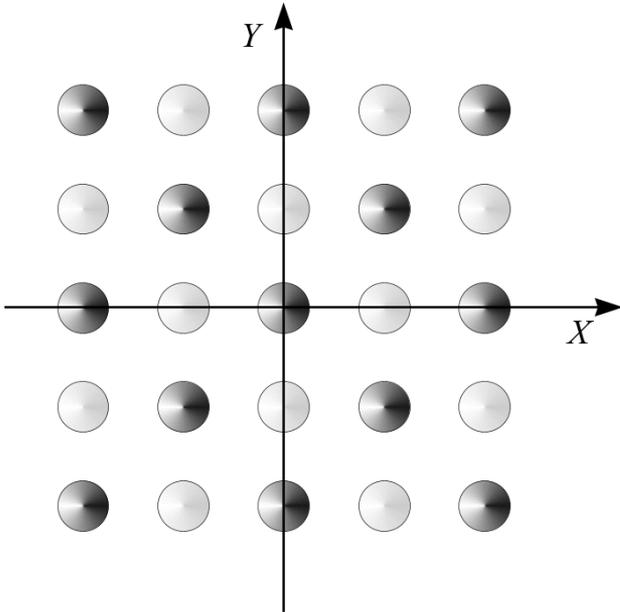
$$\mathbf{f} = -\nabla W$$

Кроме внешнего поля в спроецированное уравнение Тила включаем компоненты сил взаимодействия:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_x = -\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\mu_0}{4\pi R^2 d^3 (n^2 + m^2)^{5/2}} M_0^2 q q_{nm} [(2m^2 - n^2)x_{nm} - 3nmy_{nm}]; \\ f_y = \frac{\partial W}{\partial y} = \frac{\mu_0}{4\pi R^2 d^3 (n^2 + m^2)^{5/2}} M_0^2 q q_{nm} [(2n^2 - m^2)y_{nm} - 3nmx_{nm}]; \end{array} \right.$$



# Частный случай шахматного порядка полярностей и хиральностей:



В результате решения уравнения Тилля получаем выражение для частот мод:

$$\omega^2 = \frac{1}{2a} \left[ b \pm \sqrt{b^2 - 4ac} \right]$$

$$a = g_1^2 g_2^2; \quad b = A_x A_y (g_1^2 + g_2^2) - 2g_1 g_2 q_1 q_2 p_1 p_2 B_x B_y;$$

$$c = (A_x^2 - B_y^2)(A_y^2 - B_x^2).$$

$$A_x = -\alpha + \varepsilon \left( S_{\check{q}}^{(x)} + Q_{\check{q}}^{(x)} \cos \varphi_0 \right); \quad A_y = -\alpha + \varepsilon \left( S_{\check{q}}^{(y)} + Q_{\check{q}}^{(y)} \cos \varphi_0 \right);$$

$$B_x = \varepsilon \left( S_{\check{h}}^{(x)} + Q_{\check{h}}^{(x)} \cos \varphi_0 \right); \quad B_y = \varepsilon \left( S_{\check{h}}^{(y)} + Q_{\check{h}}^{(y)} \cos \varphi_0 \right).$$



$$S_{\text{ч}}^{(x)} = 4 \sum_0^{\infty} \sum_0^{\infty} \frac{2m^2 - n^2}{(n^2 + m^2)^{5/2}} \cos(k_x dn) \cos(k_y dm); \quad \begin{array}{l} n + m - \text{четная;} \\ n^2 + m^2 \neq 0; \end{array}$$

$$S_{\text{н}}^{(x)} = 4 \sum_0^{\infty} \sum_0^{\infty} \frac{2m^2 - n^2}{(n^2 + m^2)^{5/2}} \cos(k_x dn) \cos(k_y dm); \quad \begin{array}{l} n + m - \text{нечетная;} \\ n^2 + m^2 \neq 0; \end{array}$$

$$S_{\text{ч}}^{(x)} = 4 \sum_0^{\infty} \sum_0^{\infty} \frac{2m^2 - n^2}{(n^2 + m^2)^{5/2}} \cos(k_x dn) \cos(k_y dm); \quad \begin{array}{l} n + m - \text{четная;} \\ n^2 + m^2 \neq 0; \end{array}$$

$$S_{\text{н}}^{(x)} = 4 \sum_0^{\infty} \sum_0^{\infty} \frac{2m^2 - n^2}{(n^2 + m^2)^{5/2}} \cos(k_x dn) \cos(k_y dm); \quad \begin{array}{l} n + m - \text{нечетная;} \\ n^2 + m^2 \neq 0; \end{array}$$

$$Q_{\text{ч}}^{(x)} = 4 \sum_0^{\infty} \sum_0^{\infty} \frac{2m^2 - n^2 - h^2}{(n^2 + m^2 + h^2)^{5/2}} \cos(k_x dn) \cos(k_y dm); \quad n + m - \text{четная;}$$

$$Q_{\text{н}}^{(x)} = 4 \sum_0^{\infty} \sum_0^{\infty} \frac{2m^2 - n^2 - h^2}{(n^2 + m^2 + h^2)^{5/2}} \cos(k_x dn) \cos(k_y dm); \quad n + m - \text{нечетная;}$$

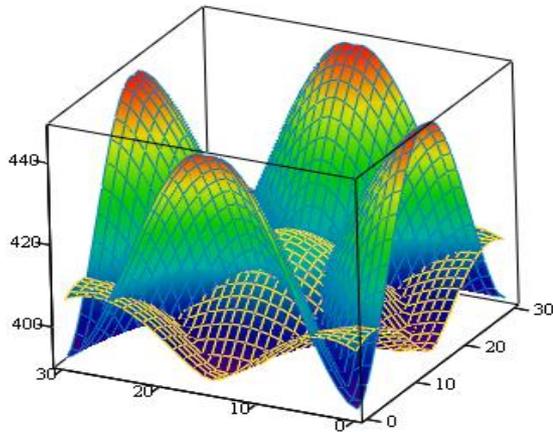
$$Q_{\text{ч}}^{(x)} = 4 \sum_0^{\infty} \sum_0^{\infty} \frac{2m^2 - n^2 - h^2}{(n^2 + m^2 + h^2)^{5/2}} \cos(k_x dn) \cos(k_y dm); \quad n + m - \text{четная;}$$

$$Q_{\text{н}}^{(x)} = 4 \sum_0^{\infty} \sum_0^{\infty} \frac{2m^2 - n^2 - h^2}{(n^2 + m^2 + h^2)^{5/2}} \cos(k_x dn) \cos(k_y dm); \quad n + m - \text{нечетная;}$$



# Дисперсионные законы (частные случаи):

## Вариант 1:



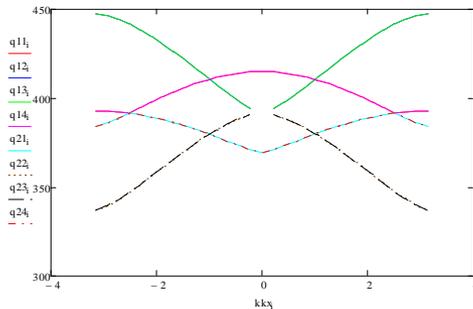
- межслойного взаимодействия нет ( $C=0$ )
- внешнего поля нет.

Совпадают с результатами работ:

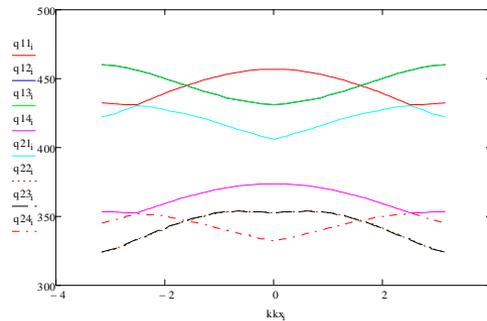
1. P.D. Kim, V.A. Orlov, R. Yu. Rudenko, V.S. Prokopenko, I.N. Orlova, A.V. Kobayakov, On the resonant state of magnetization in array of interacting nanodots, JMMM 10.1016/j.jmmm.2016.12.125.

2. Ким П.Д., Орлов В.А., Руденко Р.Ю., Прокопенко В.С., Орлова И.Н., Замай С.С., "Коллективная динамика магнитных вихрей в массиве взаимодействующих наноточек", Письма в ЖЭТФ, 2015, т.101, вып. 8, с. 620-626.

$\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{13}$



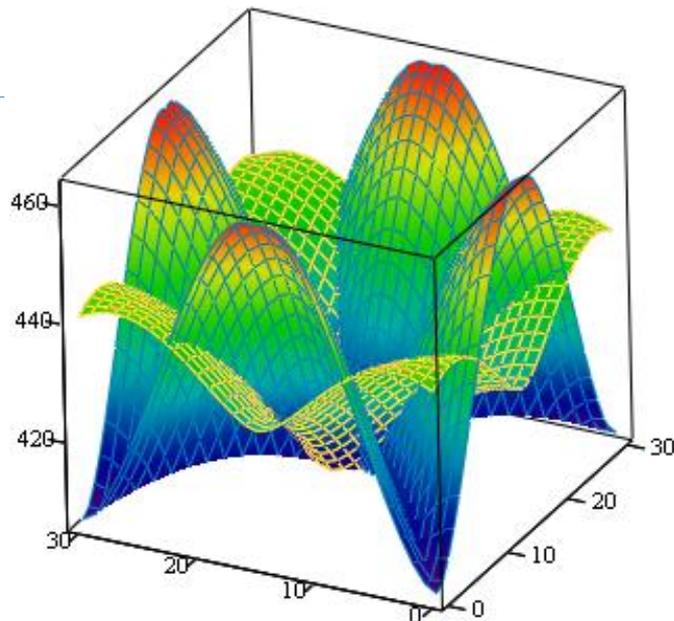
а)



б)

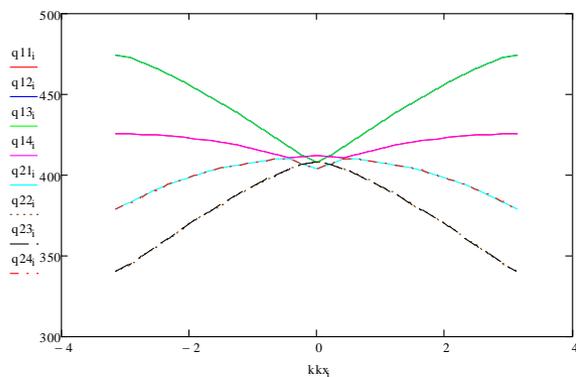
а) внешнего поля нет;  
б) включено перпендикулярное магнитное поле.

## Вариант 2:

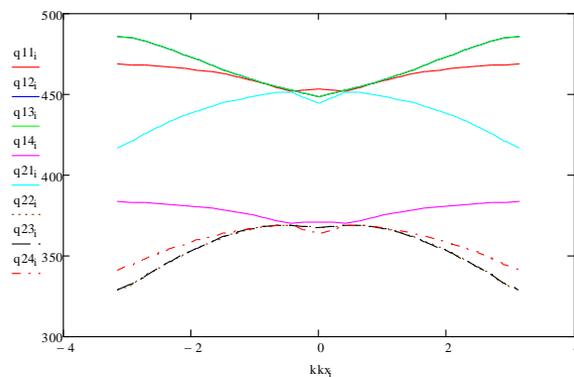


- Межслойное взаимодействие есть ( $C=1$ )
- внешнего поля нет.

$\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{13}$



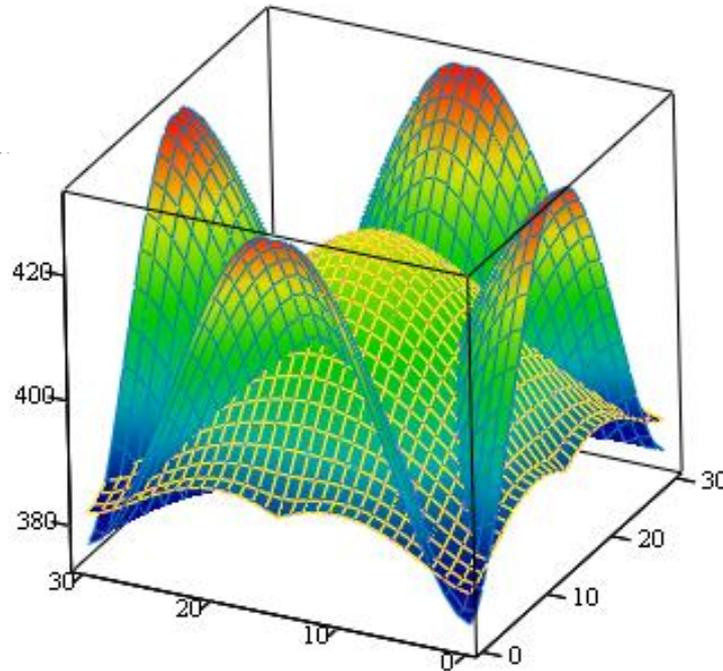
а)



б)

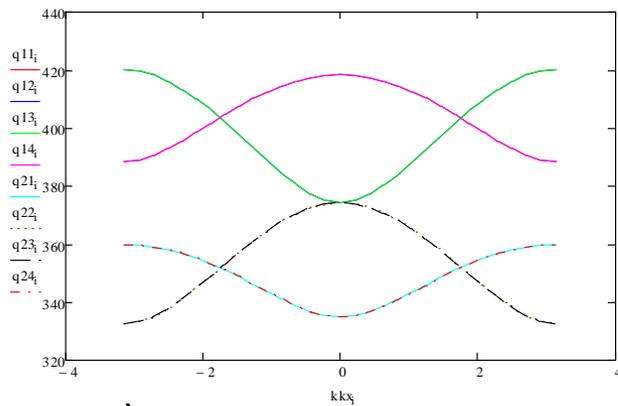
- а) внешнего поля нет;
- б) включено перпендикулярное магнитное поле.

# Вариант 3:

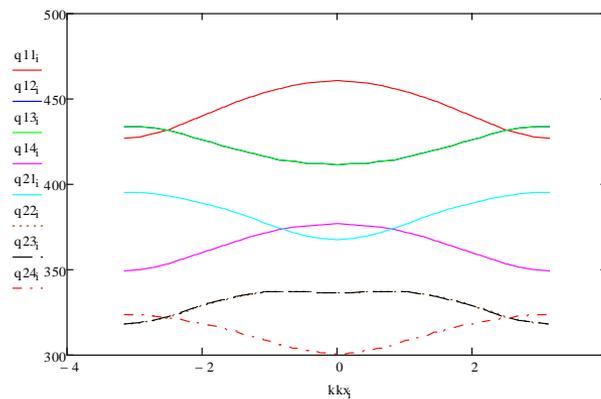


- Межслойное взаимодействие есть ( $C=-1$ )
- внешнего поля нет.

$\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{13}$



а)



б)

- а) внешнего поля нет;
- б) включено перпендикулярное магнитное поле.



## Выводы к III части:

---

- ▶ При включении внешнего магнитного поля происходит снятие вырождения резонансных частот в длинноволновом пределе;
- ▶ В двухслойной системе эффект расщепления более выражен, чем в однослойной;
- ▶ В случае длинноволновых колебаний хотя бы по одному направлению влияние взаимодействия на частоты ослаблено.



## Глава IV. Перспективы тематики связанных колебаний как область исследовательской деятельности учащихся

В настоящее время важна не передача ученикам знаний в готовом виде, а создание условий для эффективной деятельности обучающихся в процессе обучения. Это, в свою очередь, позволяет учить детей ставить цели, самостоятельно мыслить, а также выдвигать гипотезы и выбирать подходящие методы, то есть провести исследование и освоить методы исследовательской деятельности. Поэтому появляется необходимость использовать научно-исследовательскую деятельность учащихся в работе каждого учителя.

Представленная тематика частично реализована в школе 145 в рамках Краевого проекта по развитию инженерного образования (факультатив, цикл лекций, лабораторные работы на уроках информатики по моделированию колебаний).

Анализ деятельности показал:

1. тема “Связанные колебательные движения” актуальна и перспективна в качестве части внеурочной деятельности учителя по руководству деятельности учащихся.
2. Привлечение учащихся к исследовательской деятельности позволяет вооружить их методами познания, сформировать познавательную самостоятельность.



# Заключение:

---

- ▶ В работе были получены следующие результаты:
  - ▶ 1) Проанализированы кривые поглощения для двух одномерных связанных маятника с различающимися параметрами, которые можно рассматривать как учебные в частных проявлениях.
  - ▶ 2) Получен закон дисперсии для двухслойного массива взаимодействующих магнитных нанодисков, как пример важной роли взаимодействия в магнетизме.
  - ▶ 3) Спектр неисследованных задач в рамках настоящей тематики может быть вынесен на исследовательскую работу с талантливыми школьниками
- 



# Литература

- Патрин К.Г., Яриков С.А., Яковчук В.Ю., Патрин Г.С., Саломатов Ю.П., Плеханов В.Г., Магнитный резонанс в пленках FeNi/Bi/FeNi, Письма в ЖТФ 2015, 41, с. 48-54.
- Патрин Г.С., Шиян Я.Г., Патрин К.Г., Юркин Г.Ю., Синтез и магнитные свойства пленок  $[(\text{CoP})_{\text{soft}}/\text{NiP}/(\text{CoP})_{\text{hard}}/\text{NiP}]_n$ , Решетневские чтения 2015, 1, с. 539-541.
- Orlov V.A., Kim P.D., On Low-frequency Oscillations of a Bloch-point in a Nanodisk, Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics 2013, т. 6, № 1, pp. 86–96.
- V. S. Prokopenko, P. D. Kim, V.A. Orlov, B.V. Vasiliev, D. K. Vovk, S.E. Zatsepilin, R.Yu. Rudenko, Lorentz Microscopy of Permalloy Film Microdots, Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics 2013, т. 6, №2, pp. 262–269.
- Ким П.Д., Орлов В.А., Прокопенко В.С., Замай С.С., Принц В.Я., Руденко Р.Ю., Руденко Т.В., О низкочастотном резонансе магнитных вихрей в микро- и нанопятнах, ФТТ, 2015, т.57, № 1, с. 29-36.
- Ким П.Д., Орлов В.А., Руденко Р.Ю., Прокопенко В.С., Орлова И.Н., Замай С.С., "Коллективная динамика магнитных вихрей в массиве взаимодействующих наноточек", Письма в ЖЭТФ, 2015, т.101, вып. 8, с. 620-626.
- Ким П.Д., Прокопенко В.С., Орлов В.А., Руденко Р.Ю., Руденко Т.В., Васильев Б.В., Живаев В.П., Ким Т.А., Магнитные структуры пермаллоевых пленочных микропятен, Доклады Академии наук, сер. Физика, 2015, т. 463, вып. 1, с. 28-31.
- Замай С.С., Прокопенко В.С., Замай А.С., Денисенко В.В., Ким П.Д., Орлов В.А., Замай Г.С., Иванченко Т.И., Замай Т.Н., Функционализированные аптамерами магнитные нанодиски для нанохирургии опухолей, Сибирское медицинское обозрение, 2015. №6, с. 48-54.
- P.D. Kim, V.A. Orlov, R.Yu. Rudenko, V.S. Prokopenko, I.N. Orlova, A.V.Kobyakov, On the resonant state of magnetization in array of interacting nanodots, JMMM 440C, 2017, pp. 170-173. (10.1016/j.jmmm.2016.12.125).
- Д.И. Трубецков, А.Г. Рожнев, Линейные колебания и волны ([http://window.edu.ru/resource/890/52890/files/lin\\_study.pdf](http://window.edu.ru/resource/890/52890/files/lin_study.pdf))

Актуальные задачи педагогики (III): материалы междунар. заоч. науч. конф. (г. Чита, фев-раль 2013 г.). – Чита: Издательство Молодой ученый, 2013. – vi, 194 с.

---

Спасибо за внимание!

