

Анализ экранирующих свойств шунгита для электромагнитного излучения показал, что на уровень напряжённости магнитного поля оказывает влияние не только наличие шунгита, но и расстояние между источником излучения и датчиком магнитометра. При этом наличие стекла толщиной 5 мм снижает уровень показателей напряжённости магнитного поля на 14–21%, а добавочный 1 см слой шунгита снижает уровень напряжённости магнитного поля ещё на 20–32%. Сочетание двух видов экранирования (стекло и шунгит) позволяет уменьшить показатели напряжённости магнитного поля телефонных аппаратов на 46–51%. Это свойство природного шунгита можно

использовать для создания защитных устройств, оболочек и каркасов для мощных промышленных и бытовых источников электромагнитного и постоянного магнитного поля. Можно предположить, что включение шунгита в состав материалов для создания чехлов, защитных плёнок для экранов телефонных аппаратов разных моделей поможет снизить уровень напряжённости электромагнитного поля и его вредное влияние на организм человека. Полученные результаты исследований подчёркивают широкое разнообразие и некоторую необычность свойств шунгита, и показывают необходимость проведения дополнительных исследований этого ископаемого минерала.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Бакс, К. Богатства земных недр. М.: Прогресс, 1986. — 467 с.
2. Берёзкин, В. И. Углерод: замкнутые наночастицы, макроструктуры, материалы. — СПб.: АРТЭГО, 2013. — 450 с.
3. Куротченко, С. П., Субботина Т. И. Использование шунгита для снижения уровня облучения организма пользователя сотовой связи // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2004. — Т. 7, № 2. — с. 80–88.
4. Мосин, О. В., Игнатов И. Состав и структурные свойства добываемого в России природного фуллеренсодержащего минерала шунгита // Наноинженерия. — 2012. — № 6. — с. 17–23.
5. Мосин, О. В., Игнатов И. Применение природного фуллеренсодержащего минерала шунгита в строительстве и строительных технологиях // Нанотехнологии в строительстве. — 2012. — № 6. — с. 22–34
6. Соловов, В. К. Радиозащитные свойства композиционных материалов на основе шунгитовых пород и сооружений из этих материалов, Дисс. канд. техн. наук., — Петрозаводск, 1990, 155 с.
7. Шунгиты — новое углеродистое сырьё. / Под ред. В. А. Соколова, Ю. К. Калинина, Е. Ф. Дюккиева. — Петрозаводск, «Карелия» 1984. — 182 с.

## Фокусировка атомных столкновений в кристаллах

*Белкина Анастасия Геннадьевна, учащаяся 10 класса;*

*Кудрявцева Мария Александровна, учащаяся 10 класса*

ГБОУ г. Москвы «Школа № 1557 имени Петра Леонидовича Капицы» (г. Зеленоград, Московская обл.)

*Научный руководитель: Мусин Артем Игоревич, аспирант*

Московский государственный областной университет

*Научный руководитель: Осипова Мария Юрьевна, учитель физики*

ГБОУ г. Москвы «Школа № 1557 имени Петра Леонидовича Капицы» (г. Зеленоград, Московская обл.)

**И**онное распыление было открыто в 1852 году В. Р. Гроувом. Распыление — это удаление поверхностных атомов при бомбардировке твёрдого тела ускоренными частицами, происходящее при столкновении частиц и атомов тела в приповерхностных слоях. После столкновения некоторые атомы, находящиеся в граничном слое, приобретают энергию, достаточную для вылета с поверхности тела (рис. 1).

Идея последовательных фокусированных столкновений — фокусон — была впервые предложена в 1957 г. Р. Силсби [1]. Фокусоны передают импульс неподвижным атомам плотноупакованной цепочки, так, что он распространяется под углом  $\theta$  к оси цепочки, меньшим при каждом следующем столкновении.

Изучение фокусировки атомных столкновений очень важно для изучения радиационных возмущений и для изучения катодного распыления. Также изучение распыления поверхностей под действием быстрых частиц имеет особое значение, в частности, в связи с запуском искусственных спутников Земли и космических кораблей, корпус которых бомбардируется частицами в верхних слоях атмосферы и в межпланетном пространстве [2]. Немаловажны и закономерности разрушения металлов в результате ионной бомбардировки при конструировании плазменных и ионных двигателей для космических кораблей. Изучение механизма распыления металлов под действием ионов, имеющих относительно высокую энергию, актуально из-за влияния этого процесса на загрязнение плазмы в термоядерных

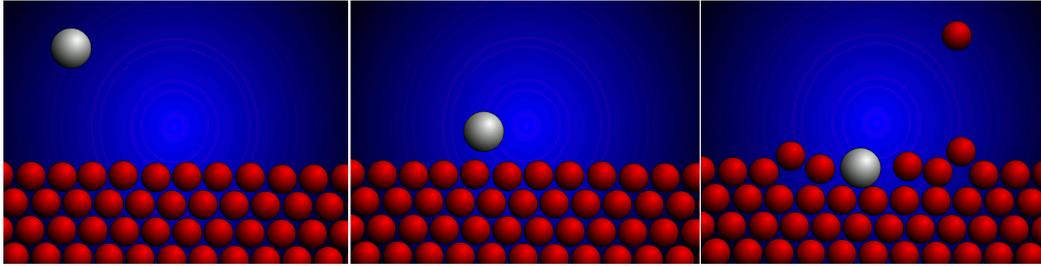


Рис. 1. Падающий ион, падающий на поверхность твердого тела, вызывает каскад столкновений, что приводит к эмиссии его атомов

установках. Также изучение фокусировки атомных столкновений важно для анализа и очистки различных поверхностей, создания наноструктур, пор или другого рельефа, исследования дефектов поверхностей в полупроводниках.

Рассмотрение, проведенное Силсби, показывает, что при  $r$  (диаметр шара), близких по величине к  $D$  (расстояние между шарами), и при малых  $D$  движущаяся частица передает свой импульс неподвижным атомам плотноупакованной цепочки, так, что он распространяется под углом  $\theta$  к оси цепочки, меньшим при каждом следующем столкновении.

Влияние регулярного расположения атомов в кристаллической решетке твердых тел приводит к тому, что при бомбардировке заряженными или нейтральными частицами преобладает распространение волны столкновений атомов вдоль направлений наиболее плотной упаковки решетки [3].

В 1955 году Венер озвучил идею, что ион, ударяющий твёрдое тело, передает свой импульс атомам плотноупакованной цепочки распыляемого кристалла, вследствие чего на коллекторе вблизи распыляемого образца образуется осадок в виде симметричных пятен — «пятен Венера» (рис. 2) [4].

По предположению Р. Силсби, картина пятен при эмиссии атомов с поверхности кристалла обусловлена распространением фокусированных цепочек атомных столкновений, но в 1966 году К. Леман, П. Зигмунд и Д. Харрисон показали, что роль фокусонов в механизме распыления не всегда достаточно значительна как при малых, так и высоких энергиях бомбардировки, и что «пятна Венера» могут быть причиной упорядоченного расположения атомов лишь двух приповерхностных атомных слоёв кристалла [5, 6].

Р. Нельсон и М. Томпсон наблюдали распределение осадка в виде симметричных пятен при распылении поликристаллических мишеней, что объяснялось как результат фокусировки импульса линзами из нескольких атомов [7].

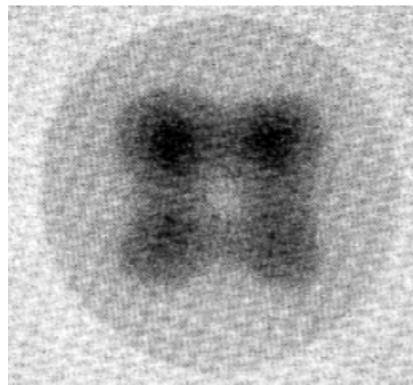


Рис. 2. Пятна Венера, обнаруженные при бомбардировке поверхности Ag ионами Hg<sup>+</sup> с энергией 100 эВ

**Постановка задачи.** Р. Силсби впервые указал, что в плотноупакованной изолированной цепочке равноотстоящих атомов при определенных условиях может происходить фокусировка удара. Рассмотрим одномерную цепочку из большого числа атомов на расстоянии  $D$  друг от друга, которые мы будем считать жесткими шарами с диаметром  $r$ . Сообщим крайнему шару скорость  $v_0$  под углом  $\theta_0$  к цепочке (рис. 3).

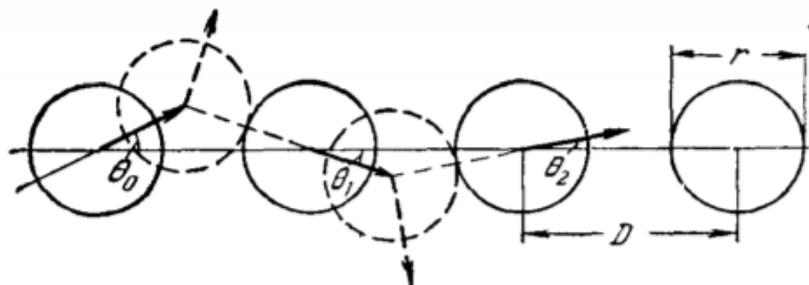


Рис. 3. Фокусирующий эффект при распространении удара вдоль линейной цепочки жестких шаров

Из закона сохранения импульса и энергии следуют рекуррентные соотношения, где  $\theta_n$  — угол между вектором скорости  $n$ -го шара и направлением цепочки,  $\alpha=D/r$ ,  $E_n$  — кинетическая энергия, которая передается при столкновении:

$$\sin \theta_n = \sin \theta_{n-1}(\alpha \cos \theta_{n-1} - \sqrt{1 - \alpha^2 \sin^2 \theta_{n-1}}),$$

$$E_n = E_{n-1}(1 - \alpha^2 \sin^2 \theta_{n-1}).$$

Применяя приближение малых углов, получаем:

$$\theta_n = \theta_{n-1}(\alpha - 1)$$

Отношение  $\theta_n/\theta_{n-1}$  называется параметром фокусировки  $\Lambda$ . Если  $\Lambda < 1$ , то образуется цепочка фокусирующих столкновений (фокусон), в противном случае — расфокусирующих (краудион).

Итак, для параметра фокусировки получаем соотношение:

$$\Lambda = \alpha - 1$$

Таким образом, образование фокусон (по крайней мере, при малых углах столкновения) возможно при  $\alpha < 2$ .

**Критический угол образования фокусона.** Найдём максимальный начальный угол, при котором столкновение все еще возможно (оно будет касательным). Так как скорость  $v_0$  направлена по касательной (рис. 4), то получившийся треугольник будет прямоугольным. Из него мы находим:

$$\sin \theta_{\max} = \frac{r}{D} = \frac{1}{\alpha}$$

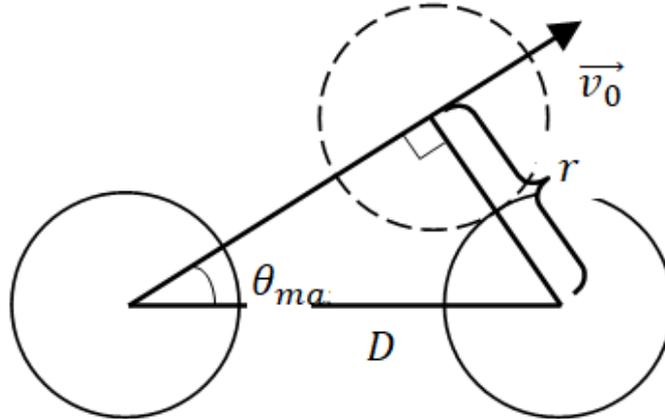


Рис. 4. К расчету максимального начального угла

Отметим, что при  $\theta_0 > \theta_{\max}$  выражение  $1 - \alpha^2 \sin^2 \theta_0$  становится отрицательным и рекуррентные соотношения теряют смысл.

Теперь определим критический угол  $\theta_c$ , при котором  $\theta_1 = \theta_0$ . Из рекуррентных соотношений получаем уравнение

$$\alpha \cos \theta_c - \sqrt{1 - \alpha^2 \sin^2 \theta_c} = 1.$$

Уединим корень и возведем в квадрат:

$$\alpha^2 \cos^2 \theta_c - 2\alpha \cos \theta_c + 1 = 1 - \alpha^2 \sin^2 \theta_c;$$

после использования основного тригонометрического тождества получим

$$\cos \theta_c = \frac{\alpha}{2}.$$

Так как косинус любого угла не может превосходить единицы, получаем ограничение на  $\alpha$  в виде  $\alpha \leq 2$ . При  $\alpha = 2$  критический угол равен нулю. Таким образом, полностью подтверждается предположение о том, что при ненулевом начальном угле (необязательно малом) образование фокусона возможно только при  $\alpha < 2$ .

**Энергия фокусировки.** Рассмотрим цепочку из очень большого количества атомов. Значение энергии, которая будет передана от первого атома к последнему, может быть найдена путем «разворачивания» рекуррентных соотношений и последующим предельным переходом  $n \rightarrow \infty$ . Эта энергия и называется энергией фокусировки. Итак, получаем такое выражение:

$$\frac{E_\Phi}{E_0} = (1 - \alpha^2 \sin^2 \theta_0)(1 - \alpha^2 \sin^2 \theta_1)(1 - \alpha^2 \sin^2 \theta_2) \dots$$

Применим приближение малых углов и раскроем скобки, оставляя только слагаемые вида  $\theta_i^2$ . Получим:

$$\frac{E_\Phi}{E_0} = 1 - \alpha^2(\theta_0^2 + \theta_1^2 + \theta_2^2 + \dots) = 1 - \alpha^2 \theta_0^2(1 + \Lambda^2 + \Lambda^4 + \dots).$$

В скобках стоит сумма бесконечно убывающей геометрической прогрессии со знаменателем  $\Lambda^2$ . Используем известную формулу и запишем:

$$\frac{E_\Phi}{E_0} = 1 - \frac{\alpha^2 \theta_0^2}{1 - \Lambda^2}$$

Итак, мы получили очень осмысленное выражение, поскольку дробь в правой части характеризует долю энергии, потерянной в цепочке столкновений.

**Методика исследования.** В данной задаче используется программа Focuson (рис. 5), которая была написана на языке программирования Object Pascal с использованием среды программирования Borland Delphi 7. В процессе выполнения программы происходит моделирование и визуализация столкновений шаров. Основными элементами окна программы являются панель ввода данных и область моделирования. В соответствующие поля на панели вводятся количество частиц (от 2 до 10), начальный угол  $\theta_0$  (в градусах), начальная скорость  $v_0$ ,  $D$  и  $\alpha$ . При этом единицей длины является пиксель, а единицей времени — интервал таймера (тик). При нажатии на кнопку “Старт” первому шару задается начальная скорость  $v_0$  под углом  $\theta_0$  к цепочке. Для простоты расчетов движение рассматривается в плоскости  $(x, y)$ , тем самым шары ведут себя как диски того же радиуса. Это приближение оправдано, т. к. рассматриваемая модельная система имеет выраженную осевую симметрию, и всегда можно повернуть систему координат так, чтобы все столкновения происходили в одной плоскости.

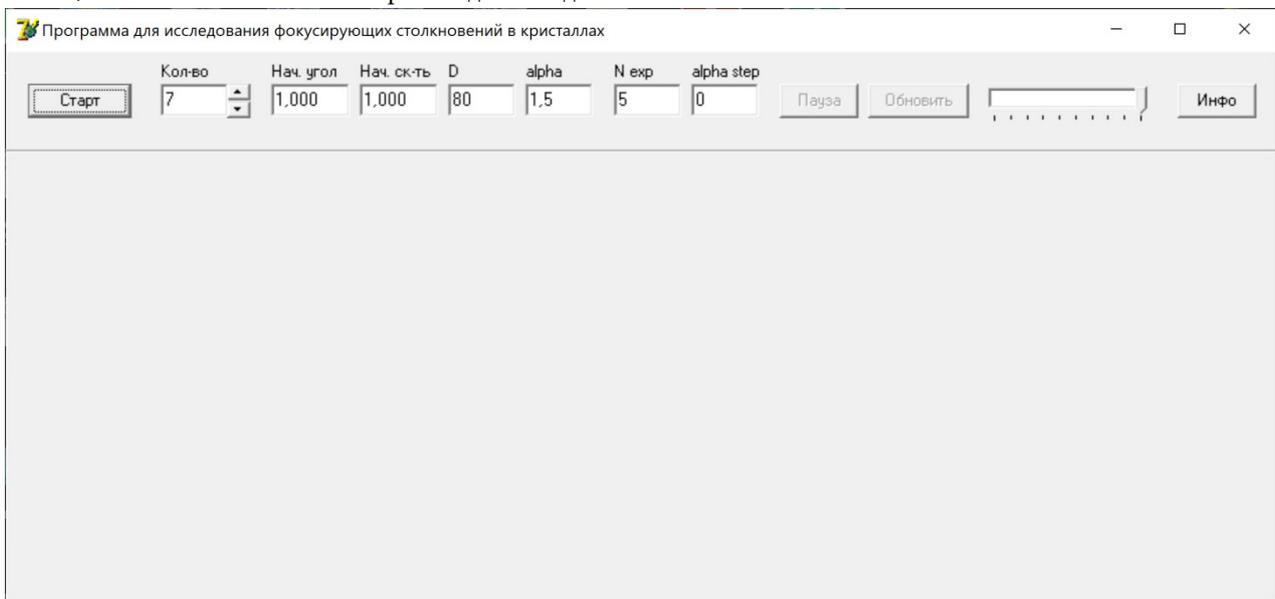


Рис. 5. Скриншот программы

На каждом временном шаге выполняется сдвиг шаров:

$$\begin{aligned} x_i &\rightarrow x_i + v_{xi} \Delta t, \\ y_i &\rightarrow y_i + v_{yi} \Delta t. \end{aligned}$$

Если  $i$ -ый и  $j$ -ый шар сближаются на расстояние  $D \leq r$ , то происходит абсолютно упругое соударение. Можно показать, что применение закона сохранения импульса и энергии приводит к следующим формулам:

$$\begin{aligned} v_{xi} &\rightarrow Av_{xi} - Bv_{yi} + Cv_{xj} + Bv_{yj}; \\ v_{yi} &\rightarrow -Bv_{xi} + Cv_{yi} + Bv_{xj} + Av_{yj}; \\ v_{xj} &\rightarrow Cv_{xi} + Bv_{yi} + Av_{xj} - Bv_{yj}; \\ v_{yj} &\rightarrow Bv_{xi} + Av_{yi} - Bv_{xj} + Cv_{yj}. \end{aligned}$$

Коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  рассчитываются по координатам шаров в момент столкновения следующим образом:

$$A = \frac{(y_i - y_j)^2}{d^2}, B = \frac{(x_i - x_j)(y_i - y_j)}{d^2}, C = \frac{(x_i - x_j)^2}{d^2}.$$

После каждого соударения рассчитываются  $\theta_i$  и  $E_i$ , которые отображаются в текстовых полях в нижней части окна и записываются в текстовые файлы. Эти файлы можно импортировать в Microsoft Excel или OpenOffice Calc для дальнейшей обработки.

**Результаты и обсуждение.** При  $\theta_0 = 1^\circ$  было запущено моделирование цепочки столкновений при разных  $\alpha$ . Визуально и по рассчитанным значениям  $\theta_i$  было определено, что при  $1 < \alpha < \alpha_{кр}$  происходят фокусирующиеся столкновения (фокусонны), а при  $\alpha > \alpha_{кр}$  — расфокусирующиеся (краудионы), где  $\alpha_{кр} \approx 2$ .

Методом подбора был определен критический начальный угол  $\theta_c$  при различных  $\alpha$ . График зависимости косинуса этого угла представлен на рис. 6. Была выполнена аппроксимация с использованием метода наименьших квадратов (МНК). Полученный по методу МНК угловой коэффициент  $a \approx 0,5102$  на 2 % отличается от теоретического  $a_{\text{теор}} = 0,5$ . Свободный коэффициент  $b \approx -0,0156$  также близок к теоретическому значению  $b_{\text{теор}} = 0$ . Близкое к единице значение  $R^2$  подтверждает согласие результатов с аналитической формулой.

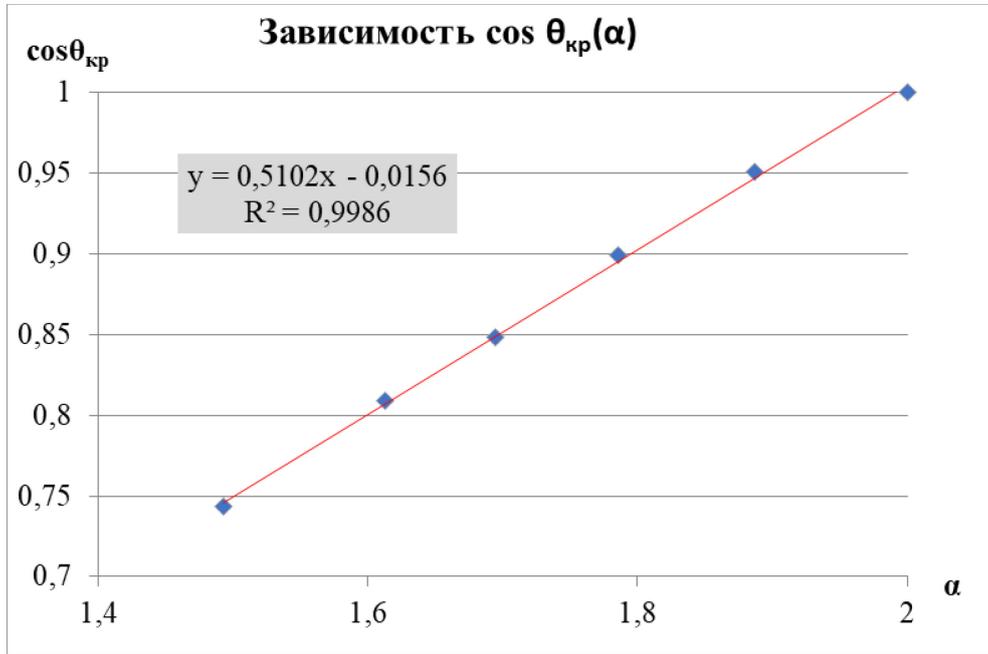


Рис. 6. Зависимость  $\cos \theta_{\text{кр}}$  от  $\alpha$ . Указаны коэффициенты линейной зависимости и величина достоверности  $R^2$

Для начального угла  $\theta_0 = 5^\circ$  был рассчитан средний параметр фокусировки  $\Lambda$  для значений  $\alpha$  в диапазоне от 1,1 до 1,7. График зависимости  $\Lambda(\alpha)$  показан на рис. 7. Полученные по методу МНК коэффициенты  $a \approx 1,025$  и  $b \approx -1,015$  всего на 3 % отличаются от теоретических  $a_{\text{теор}} = 1$  и  $b_{\text{теор}} = -1$ . Значение  $R^2$  ( $>0,99$ ) показывает, что линейное приближение в данном случае более чем оправдано.

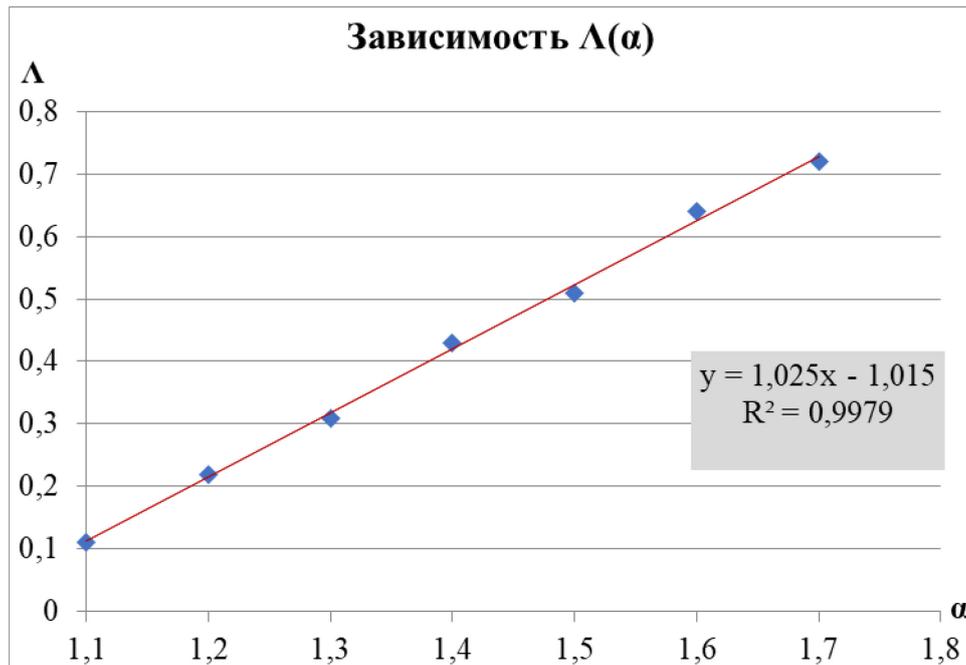


Рис. 7: Зависимость параметра фокусировки от  $\alpha$  при  $\theta_0 = 5^\circ$ . Указаны коэффициенты линейной зависимости и величина достоверности  $R^2$

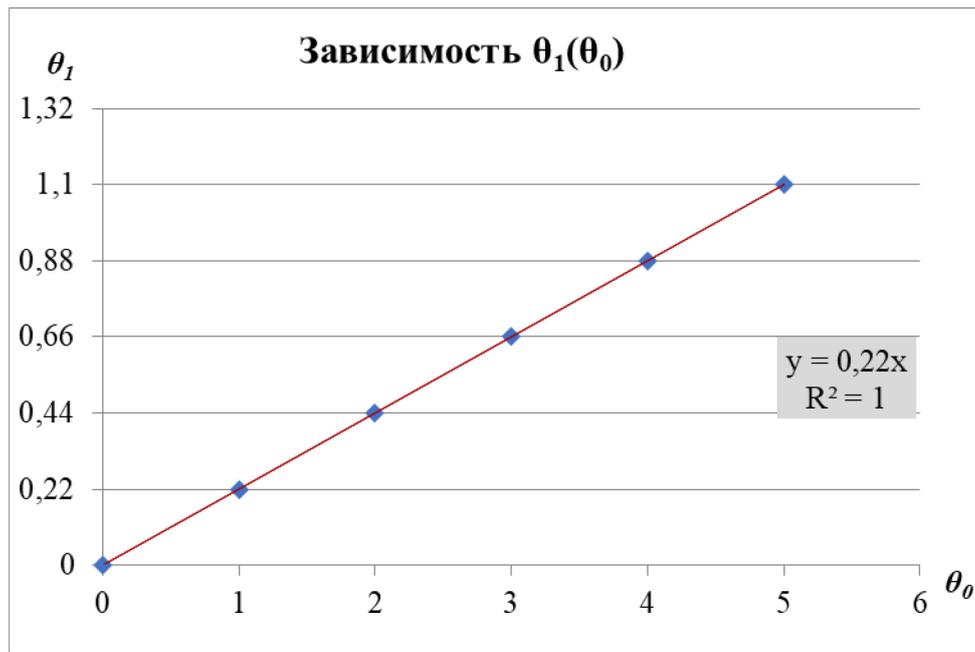


Рис. 8. Зависимость  $\theta_1$  от  $\theta_0$ . Указаны коэффициенты линейной зависимости и величина достоверности  $R^2$

При  $\alpha = 1,2$  были рассмотрены цепочки столкновений при разных начальных углах  $\theta_0$ . График зависимости  $\theta_1$  от  $\theta_0$  показан на рис. 8. Полученный по методу МНК коэффициент  $\Lambda = 0,22$  на 10 % отличается от  $\Lambda_{\text{теор}} = 0,2$ . Значение  $R^2$  совпадает с единицей с точностью  $10^{-5}$ , поэтому после округления отображается как 1.

При  $\theta_0 = 5^\circ$  была рассчитана энергия фокусировки для значений  $\alpha$  в диапазоне от 1,1 до 1,7. График зависимости  $E_\phi(\alpha)$  показан на рис. 9. При  $\theta_0 = 1^\circ$  была рассчитана энергия фокусировки для значений  $\alpha$  в диапазоне от 1,1 до 2. График зависимости  $E_\phi(\alpha)$  показан на рис. 10. Визуально было определено, что при  $\alpha \geq 1,9$  значительно убывает. Это позволяет сделать вывод, что фокусировка действительно более эффективна при меньших  $\alpha$ , т. к. все меньше энергии рассеивается «в сторону».

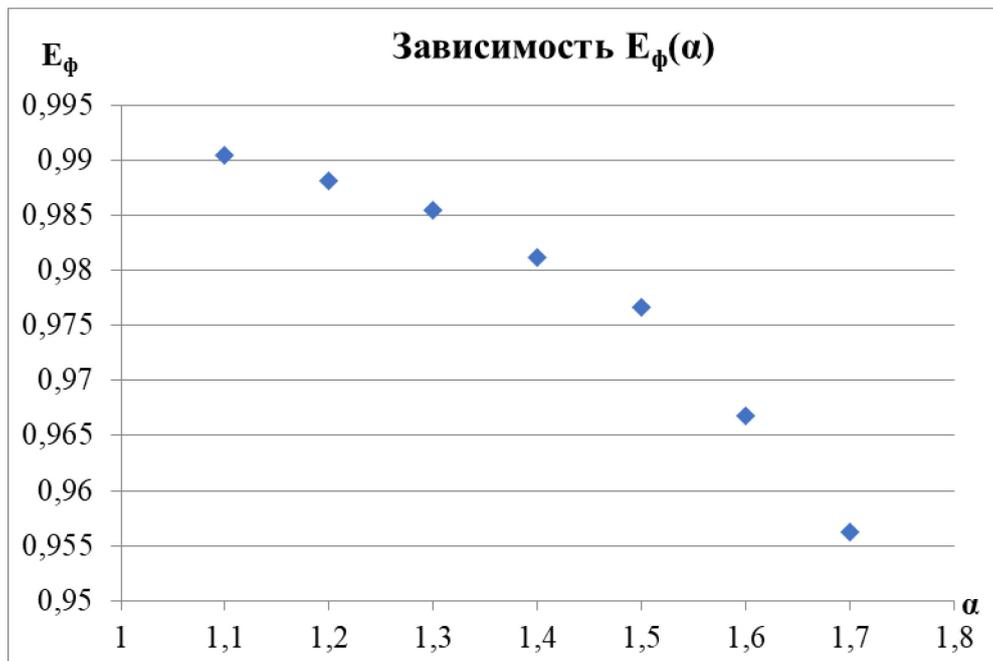


Рис. 9. Зависимость энергии фокусировки от  $\alpha$ . Указаны коэффициенты линейной зависимости и величина достоверности  $R^2$

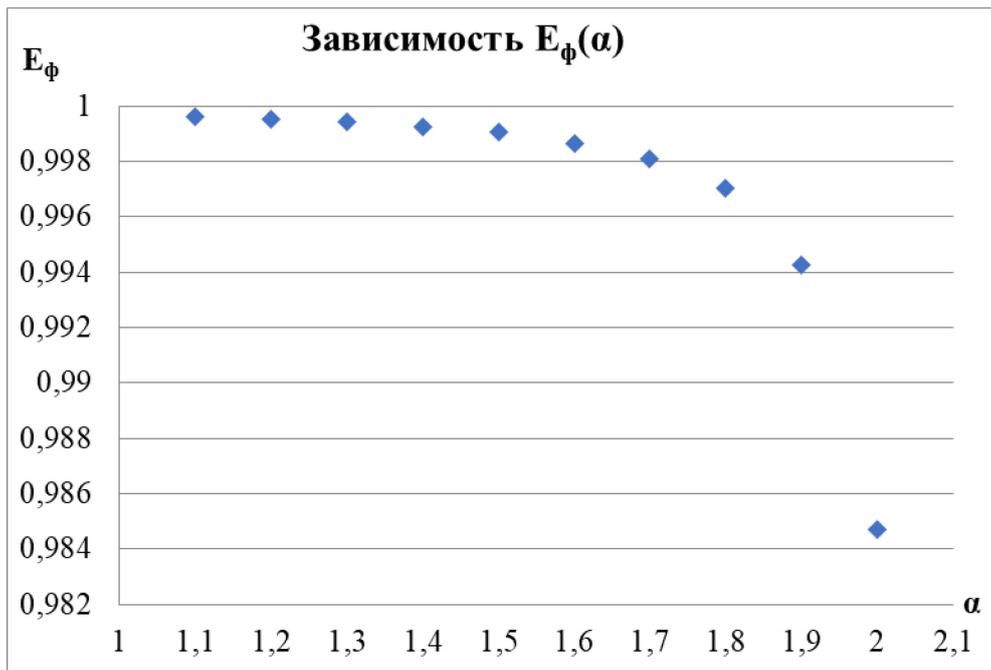


Рис. 10. Зависимость энергии фокусировки от  $\alpha$ . Указаны коэффициенты линейной зависимости и величина достоверности  $R^2$

**Выводы.** Нами был создан программный продукт, позволяющий исследовать фокусировку столкновений в цепочке атомов. С использованием численной модели была проверена фокусонная модель Р. Силсби [1]. Результаты хорошо согласуются.

Результаты работы могут быть полезны для понимания процессов атомных столкновений, которые важны для анализа и очистки поверхности, создания наноструктур или какого-либо рельефа, для исследования дефектов в полупроводниках, а также для изучения закономерности разрушения металлов в результате ионной бомбардировки при конструировании плазменных и ионных двигателей для космических кораблей. Ещё их можно будет использовать для объяснения пятен Венеры при распылении монокристаллов.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М. В. Ломоносова [8].

Результаты работы в 2019–2020 учебном году были представлены на следующих конференциях:

- XXIX Открытая московская инженерная конференция школьников «Потенциал» (Москва, 31 января — 1 февраля 2020 г.)
- Всероссийский конкурс научных работ школьников «Юниор» (Москва, 31 января — 2 февраля 2020 г.)
- Конференция «Наука для жизни» (Москва, 1–10 апреля 2020 г.)
- Конференция «Курчатовский проект — от знаний к практике, от практики к результату» (Москва, 13–15 апреля 2020 г.)

На конференции «Потенциал» доклад занял II место в секции «Физика».

*Работа выполнена на базе ГБОУ Школа № 1557 имени Петра Леонидовича Капицы в рамках проекта «Курчатовский проект в московской школе» совместно с лабораторией «Теоретические исследования процессов на поверхности кристаллов» МГУ им. М. В. Ломоносова. Авторы благодарят доцента кафедры общей физики физического факультета МГУ Самойлова В. Н. за неоценимый научный вклад и за обсуждение результатов, а также администрацию ГБОУ Школа № 1557 за помощь и поддержку.*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. R. H. Silsbee, Focusing in Collision Problems in Solids. // Journal of Applied Physics. 28, 1246 (1957).
2. D. McKeown, New Method for Measuring Sputtering in the Region Near Threshold // Review of Scientific Instruments. 32 (2), 133–136, (1961).
3. Р. И. Гарбер, А. И. Федоренко. Фокусировка атомных столкновений в кристаллах // Успехи физических наук (1964).

4. G. K. Wehner, Sputtering of Metal Single Crystals by Ion Bombardment // Journal of Applied Physics. 26 (8), 1056–1057 (1955).
5. Lehmann, Chr., Sigmund P. On the Mechanism of Sputtering. // Phys. Stat. Sol. 1966. V. 16. No. 2. P. 507–511.
6. Harrison, D. E., Johnson J. P., Levy N. S. Spot patterns and Silsbee chains of a Cu single crystal // Appl. Phys. Lett. 1966 V. 8 No. 2 P. 33–36.
7. Nelson, R. S., Thompson M. W. Atomic collision sequences in crystals of copper, silver and gold revealed by sputtering in energetic ion beams // Proc. Roy. Soc. 1961 V. A259. No. 1299 P. 458–479.
8. Воеводин Вл. В., Жуматий С. А., Соболев С. И., Антонов А. С., Брызгалов П. А., Никитенко Д. А., Стефанов К. С., Воеводин Вад. В. Практика суперкомпьютера «Ломоносов» // Открытые системы. — Москва: Издательский дом «Открытые системы», N 7, 2012. с. 36–39.

## Космическая операционная

*Бузаев Майкл Игоревич, учащийся*

Научный руководитель: *Ефимова Наталья Сергеевна, заместитель директора по УВР*  
МБОУ «Ордена Дружбы народов гимназия № 3 имени А. М. Горького» г. Уфы (г. Уфа)

*«Если хотите узнать секреты Вселенной,  
думайте об энергии, частоте и колебаниях».*  
*Никола Тесла*

Если Вы внимательно посмотрите вокруг, то наверняка увидите людей, у которых дрожат руки. Дрожание рук лишает людей любимой работы, не дает возможности заботиться о себе или близких. Такие люди не могут пить, не расплескав воду, не могут оставить подпись на важном документе, не могут погладить любимого внука. Врачи придумали лекарства, но, к сожалению, эти лекарства со временем перестают действовать. Изучая эту проблему, ученые нашли тот участок в мозге, который создает колебания нервных сигналов и сбивает с толку точное движение руки [1]. С тех пор уже полвека

нейрохирурги проводят многочасовые операции чтобы устранить этот глубоко расположенный участок. Они срезают голову, затем проникают внутрь черепа и добиваются до этого места через мозг инструментами.

Если вы смотрели всем известный фильм «Звёздный Путь IV. Дорога домой», то наверняка помните, как в середине восьмидесятых годов двадцатого века авторы фантастических фильмов мечтали о волшебном свистящем обруче, который без разрезов лечил голову (рис. 1). И вот это время настало. Появилось устройство, которое позволяет сделать операцию в мозге без разрезов.



Рис. 1. Кадр из фантастического фильма, где нейрохирургическая операция делалась без разрезов

Дрожание рук, звук, свет, сигнал вашего сотового телефона являются колебаниями. Явление колебаний

связано с повторяющимся смещением чего-либо то в одну, то в другую сторону. Так, дрожание рук являет-