ЗАОЧНАЯ ОЛИМПИАДА ФЭФМ

им. Н.Н. СЕМЕНОВА

Дорогие ребята!

Перед Вами – сборник задач заочной олимпиады ФЭФМ им. Н.Н. Семёнова 2019 года. В этом году, как и во все предыдущие, мы придумали для Вас уникальными задачи. Это было сделано для того, чтобы Вы могли почувствовать себя настоящими учеными: решая задачи, Вы увидите, чем именно занимается наша физтех-школа, увидите, насколько многогранной может быть физика и как тесно с ней связана химия.

Мы старались приблизить задачи к реальным проблемам, которые ежедневно возникают в работе учёных. Из-за этого вам может показаться, что они сложные, но уверяем Вас: понадобятся только знания школьной программы, смекалка и внимательность к деталям. Кроме того, в некоторых случаях использование компьютера для вычислений может значительно облегчить задачу. В тех местах, где это было необходимо, Вам даны подсказки.

Искренне надеемся, что Вы получите удовольствие от решения предложенных задач и выберете для своего дальнейшего обучения именно нашу физтех-школу.

Олимпиада посвящена 123-летию со дня рождения Н.Н. Семёнова – выдающегося ученого в области химической физики, лауреата Нобелевской премии по химии и одного из отцов-основателей МФТИ.

Дипломы победителей и призеров данной олимпиады будут учтены на собеседовании при поступлении на ФЭФМ МФТИ, а авторы лучших решений получат ценные призы.

Отсканированные решения необходимо прислать до 3 июня на почту sepmp@phystech.edu или через портал abitu.net во вкладке «Олимпиада ФЭФМ». На каждом листе работы укажите свои ФИО. На одном из листов каждого из заданий укажите свой класс и электронный адрес или иной способ для связи с Вами. Фотографии работ принимаются только если они удобочитаемы, сделаны контрастно и в хорошем качестве.

С уважением, коллектив авторов.
Долгопрудный, 2019

1. Механика (экспериментальное задание)

Цель работы: определить ускорение свободного падения с помощью машины Атвуда.

Оборудование: штатив, блок, набор грузов, линейка.

Краткое описание: машина Атвуда представляет собой укрепленный на штативе блок, через который перекинута неравстяжимая, невесомая веревка, к двум концам которой прикрепляются грузы m_1 и m_2. Система приходит в движение при различных m_1 и m_2. Измеряя ускорение этого движения в зависимости от соотношения m_1/m_2 вам предлагается вычислить ускорение свободного падения g.

Вы можете также провести любые дополнительные исследования, которые считаете необходимыми для полного анализа полученных в этом эксперименте результатов.

В качестве решения этого задания представьте выполненный по всем правилам оформления отчёт: название работы, цель, оборудование, теоретическое введение, описание эксперимента, результаты, их обработка, вывод, дополнительные материалы.

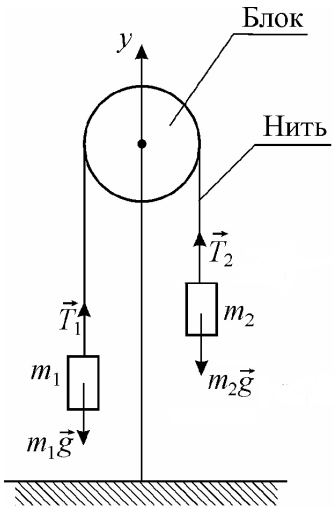


Рис. 1. Устройство машины Атвуда

2. Химия элементов

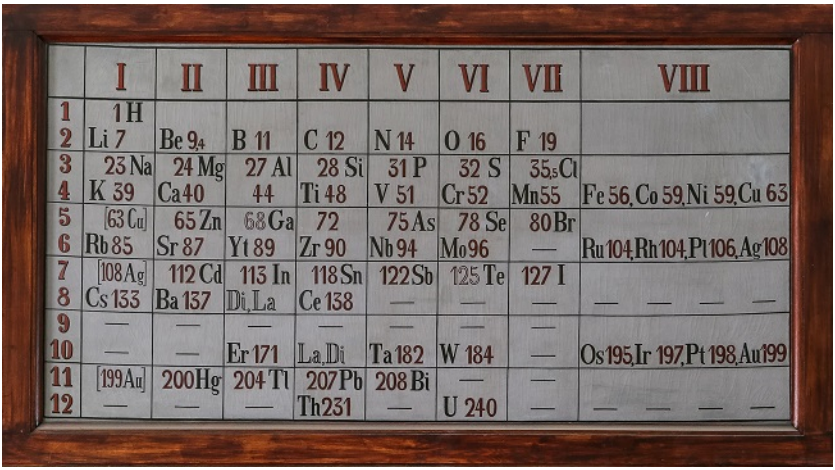
Изучение состава различных веществ было начато ещё в Средневековье. Правда, алхимики не ставили перед собой такой цели – это получалось спонтанно. Однако всё новые и новые эксперименты показывали, что элементов больше, чем 8 “первородных”: в 1766 г. Кавендиш открыл водород, в 1772 г. азот был открыт Резерфордом, а в 1774 г. Шееле – кислород (конечно, это уже не Средневековье, эти открытия – продукт развития научной мысли). Вскоре начался бум открытий химических элементов. К концу XIX века их стало так много, что появилась необходимость начать систематизацию и классификацию (читай: появилась таблица Менделеева). Каждый новый вариант проверялся и перепроверялся, а вместе с ним проходили проверку различные характеристики атомов.

И вот в 1890 году, после серии экспериментов, оказалось, что молекулярная масса азота, выделенного из воздуха, отличается от той, что была получена химическим путём.

1) Предположите, почему так произошло.

2) Оцените это различие.

3) Что нужно сделать, чтобы результаты экспериментов совпали?



	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	1 H							
2	Li 7	Be 9,4	B 11	C 12	N 14	O 16	F 19	
3	23 Na	24 Mg	27 Al	28 Si	31 P	32 S	35,5 Cl	
4	K 39	Ca 40	44	Ti 48	V 51	Cr 52	Mn 55	Fe 56, Co 59, Ni 59, Cu 63
5	[63 Cu]	65 Zn	68 Ga	72	75 As	78 Se	80 Br	
6	Rb 85	Sr 87	Yt 89	Zr 90	Nb 94	Mo 96	—	Ru 104, Rh 104, Pt 106, Ag 108
7	[108 Ag]	112 Cd	113 In	118 Sn	122 Sb	125 Te	127 I	
8	Cs 133	Ba 137	Di, La	Ce 138	—	—	—	— — — —
9	—	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	Er 171	La, Di	Ta 182	W 184	—	Os 195, Ir 197, Pt 198, Au 199
11	[199 Au]	200 Hg	204 Tl	207 Pb	208 Bi	—	—	
12	—	—	—	Th 231	—	U 240	—	— — — —

Рис. 2. Периодическая таблица Д. И. Менделеева, изготовленная по указаниям автора в 1876 году (СПбГУ, Большая химическая аудитория)

3. Плазма

Современная энергетика зиждется на сжигании углеводородов, объёмов которых по некоторым прогнозам хватит на 70, а по другим – на 250 лет. В любом случае, количество уже сожжёного углерода с каждым годом только растёт. Это коррелирует с ростом средней температуры по планете (т.н. “парниковый эффект”).

Поэтому человечество ищет любые другие пути получения энергии. Альтернативная безуглеродная энергетика сейчас основывается на строительстве ГЭС, АЭС, ветро- и солнечных генераторах. Однако, более чем 50 лет назад была выдвинута перспективная концепция термоядерного синтеза.

Одним из устройств, способных обеспечить прохождение термоядерной реакции является токамак - ТОроидальная КАмера с МАгнитными Катушками. Схема его работы изящна: в камеру, выполненную в форме тора, напускается ионизированный газ (плазма), затем при помощи систем катушек создаются тороидальные и полоидальные магнитные поля, приводящие плазму во вращение внутри тора. В ходе быстрого движения ионы газа сталкиваются и сливаются в один ион, выделяется огромная энергия.

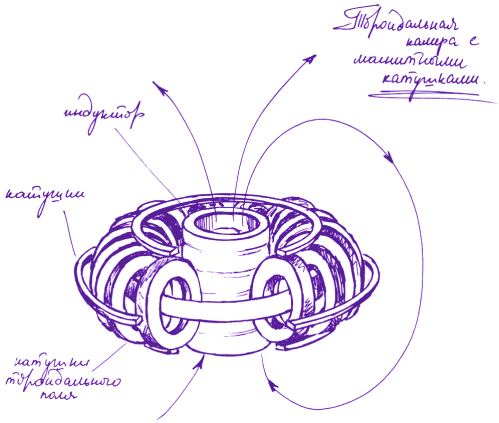


Рис. 3. Принципиальная схема токамака

1) Нарисуйте тороидальные и полоидальные магнитные поля. Укажите, какими катушками они создаются. Нарисуйте ток ионов и ток электронов. В какую сторону они направлены и почему?

Для разгона иона до необходимых энергий нужны огромные поля. По катушкам тороидального магнитного поля течёт ток I порядка 1 МА.

2) Найдите давление p, которое оказывают друг на друга соседние витки обмотки. Большой радиус тора $R = 0.4$ м, малый радиус $a = 80$ мм, диаметр провода обмотки $d = 1$ мм, плотность материала провода $\rho = 6.5$ г/см^3.

Кроме закрытых магнитных ловушек для плазмы (как токамак), существуют ещё и открытые, как например Z-пинч. Давление магнитного поля определяется выражением $p_{mag} = \frac{H^2}{8\pi}$, где H - вектор напряжённости магнитного поля, который мы будем полагать равным B - вектору индукции магнитного поля, хотя, вообще говоря, это может быть не так.

3) Для газового разряда с током плазмы I и концентрацией частиц $n[м^{-3}]$ рассчитайте равновесные значения радиусов трубок тока r_e в двух моделях:
а) “снежный плуг” - частицы, захваченные трубкой тока извне начинают участвовать в токе;
б) “огненная стена” - граница трубки тока является непроницаемой как для частиц внутри, так и для частиц снаружи.
Температура T вне трубки тока комнатная.

4. Химическое равновесие

Как известно из курса химии, электролиты бывают сильными и слабыми. Первые полностью диссоциируют в растворе, вторые – нет, то есть существует некоторое динамическое равновесие между диссоциировавшими и недиссоциировавшими формами (равновесные концентрации).

Некоторое соотношение равновесных концентраций оказывается постоянным для данного вещества при данной температуре и называется константой равновесия

$$K = \frac{[\mathrm{A}]_e{}^a[\mathrm{B}]_e{}^b}{[\mathrm{C}]_e{}^c[\mathrm{D}]_e{}^d}$$

в числителе произведение равновесных (индекс e) концентраций (квадратные скобки) продуктов (формула вещества в скобках) в степенях их стехиометрических коэффициентов, в знаменателе – реагентов.

В химическом анализе часто возникает задача определения pH раствора (pH = -lg$[\mathrm{H}^+]_e$), если в нём находится несколько электролитов.

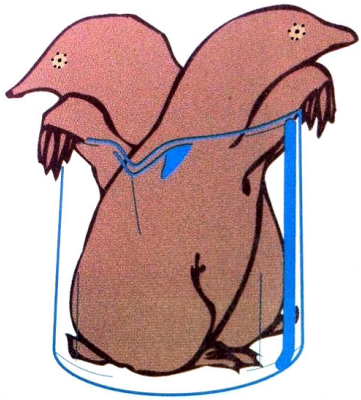
Иначе говоря: химик Гоша смешал много всего разного, измерил pH, а вы попробуйте сказать, сколько чего он туда положил.

Известно, что там было C_0 щавелевой кислоты $\mathrm{H_2C_2O_4}$. Константа равновесия диссоциации по первой ступени K_1, по второй – K_2. Влив сильный электролит NaOH, Гоша получил pH = 5. Раствор водный.

1) Сколько NaOH он туда влил?

2) Постройте график зависимости pH от влитой в раствор щёлочи NaOH (в Origin, Mathlab, Excel, Wolfram Mathematica...). Значение C_0 выберите сами, K_1, K_2 и K_w возьмите в справочнике для температуры 298 K.

3) Является ли эта система буферной смесью или нет?

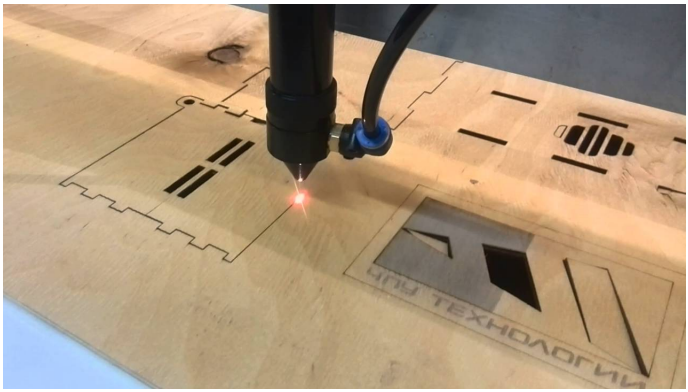


Two moles per litre

5. Оптика и фотоника

Еще одна, несомненно, важная отрасль электроники, применяемая как в науке, так и в промышленности – лазеры. Лазер был предсказан А. Эйнштейном еще в 1916-м году, но впервые изделие увидело свет только в 1960-м (Т. Майман). Важным шагом перед появлением лазера явилось создание мазера в 1954-м (А.М. Прохоров, Н.Г. Басов, Ч. Таунс). Лазеры применяются практически повсеместно: в медицине, при обработке материалов и прочая, и прочая...
Собрались как-то студенты ФЭФМ и решили организовать стартап по нанесению изображения на деревянные поверхности. Для этого предприятия они сошлись на мнении приобрести лазерный станок. Но тут они задумались, какой мощности станок им нужен, чтобы и дерево не испортить, и лишние средства не потратить...

1) Глубина прожига постоянна по всему рисунку и равна 1 мм, диаметр пучка — 2 мм, скорость движения лазера относительно дерева 0,1 см/с. Оценить мощность лазера, необходимую для нанесения рисунка с вышеуказанными параметрами, если температура возгорания дерева 210 $^\circ C$, плотность дерева 700 кг/м^3, удельная теплоемкость дерева 2300 Дж/кг-градус.



Рассчитали студенты ФЭФМ мощность и приобрели лазер, да не тут-то было... Лазер оказался бракованный. На замену уйдет несколько недель, а скоро уж заказ сдавать... Но тут вспомнили они курс физики и решили вместо лазера использовать обычную лампу, а свет собирать линзой.

2) Диаметр линзы – 5 см, фокусное расстояние – 1,5 см. Определить мощность такой лампы, чтобы она была эквивалентна мощности лазера в предыдущей части задачи, если в излучение уходит 1% от потребляемой лампой энергии. Расстояние от линзы до экрана не должно быть больше 2 см. Источник ламбертов. На каком расстоянии от линзы лучше всего расположить источник?

3) Рассчитав мощность лампы, стали студенты искать подходящий источник, но источники подходящей мощности были слишком громоздкими и разместить их внутри станка вместо лазера не представлялось возможным. Однако был подходящий источник, только в полтора раза меньшей мощности. Что нужно сделать, чтобы этот источник можно было использовать вместо теоретически рассчитанного?

6. Органическая химия

Химики Ваня и Илья захотели поиграть в сыщиков. Для этого они решили получить одно из самых распространённых веществ **F**, которое используется судебными экспертами. В качестве исходного вещества они взяли у деда Т. углеводород **A** с массовой долей водорода 6,25%. Начать свой синтез они решили с окисления кислородом воздуха в присутствии катализатора V_2O_5. Получившееся соединение **B** массой 100 г пронитровали 1 эквивалентом смеси и получили 2 продукта: $\mathbf{C}_1$ и $\mathbf{C}_2$ (выход количественный и массы $\mathbf{C}_1$ и $\mathbf{C}_2$ относятся как 1:1). Провели гидролиз $\mathbf{C}_1$ и получили продукт **D**. Далее нагрели с одним из компонентов ракетного топлива $\mathbf{X_2Y_4}$ полученный продукт **E**, получившийся продукт восстановили Na_2S до соединения **F**, масса которого составила 54,73 г. После всех этих манипуляций они очень устали и просто наблюдали ******** этого вещества в реакции с перекисью в щелочной среде.

1) Нарисуйте структурные формулы всех загаданных веществ и привести названия соединений **A**, **B**, $\mathbf{C}_1$, $\mathbf{C}_2$, **F**.

2) Приведите один из методов получения $\mathbf{X_2Y_4}$, используя крупнотоннажного вещества с аналогичным качественным составом. Назовите все вещества.

3) Зачем соединение **F** используется в судебной экспертизе?

4) Напишите слово ******** и приведите примерный механизм окисления **F** перекисью водорода в щелочной среде.

Рис. 4. *“Моя прелесть!” - Голлум, “Властелин Колец” Джон Р.Р. Толкин*

7. Вакуумная техника

Пожалуй, начало эры электроники стоит отождествлять с появлением вакуумных электрических приборов (вакуумный диод, позднее, триод, более сложные вакуумные лампы). Первые вакуумные лампы появились еще в конце позапрошлого века. Характерной особенностью и необходимым условием функционирования данного класса приборов является создание высоко разреженной среды между электродами. От качества вакуума внутри прибора будут существенно зависеть основные характеристики: обратный ток, сопротивление, тепловые потери, долговечность.

Предположим, что Леонид Андреевич захотел самостоятельно сконструировать вакуумный диод, но средств на покупку дорогих форвакуумных, и уж тем более, высоковакуумных турбомолекулярных насосов ему не выделили.

1) Помогите Леониду Андреевичу придумать относительно недорогую и простую в сборке конструкцию форвакуумного насоса.

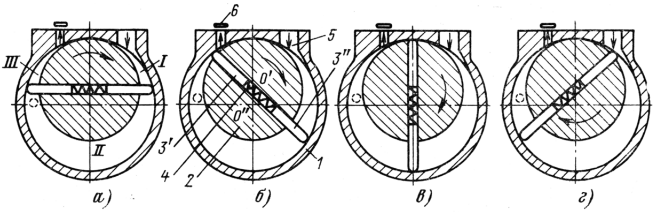


Рис. 5. Принципиальная схема форвакуумного насоса

После этого полученная вакуумная лампа уже может быть использована в каком-либо опыте, но тем не менее, вакуума, полученного указанным выше способом будет недостаточно. Здесь можно применить высоковакуумный диффузионный масляный насос.

2) Почему бы не использовать воду вместо масла в таком насосе?

Итак, Леониду Андреевичу удалось создать неплохой вакуумный диод и провести серию испытаний, подтверждающих его теорию. Представив свои результаты научной общественности, он получил всеобщее признание и грант на продолжение своих исследований и смог позволить себе приобрести установку Drytel 1025. Он снова собрал установку с небольшими модификациями и решил провести новую серию испытаний. К камере, в которой создается вакуум,

подсоединен кран, сообщающий объем камеры с атмосферой. Отверстие крана имеет круглую форму радиуса $r = 5$ мм. Толщина стенок пренебрежимо мала по сравнению с диаметром. Предположим, что Леонид Андреевич забыл закрыть кран во время выполнения работы.

3) Насколько будут отличаться данные в работе от теоретически рассчитанных, если скорость откачки насоса составляет $Q = 25$ л/с, а предельное давление, до которого можно откачать воздух из баллона при закрытом кране равно $P_{lim} = 3 \cdot 10^{-6}$ торр? Объем камеры составляет $V_0 = 10$ л, атмосферное давление $P_0 = 10^5$ Па.

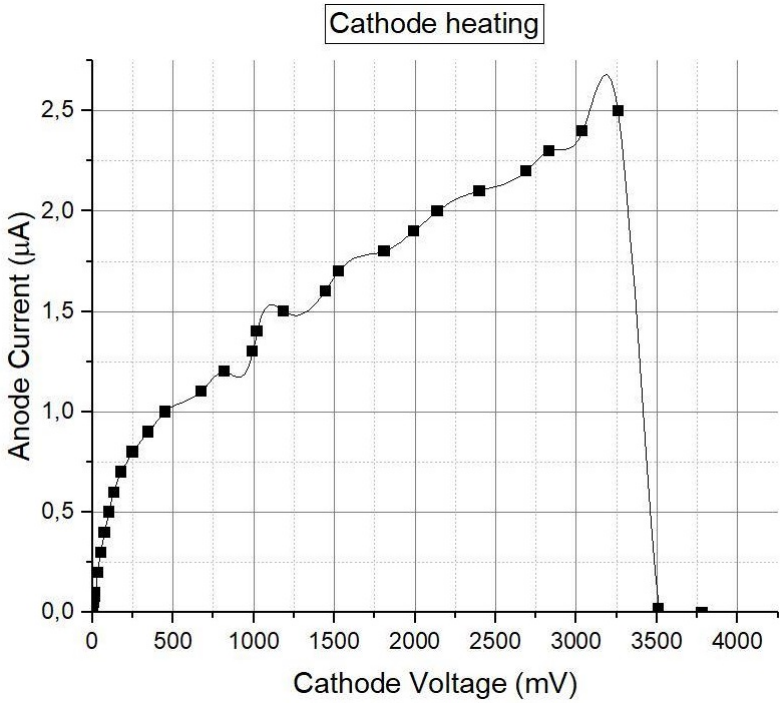
8. Вакуумная электроника

Расцвет вакуумной техники пришелся на середину XX века, пока вакуумные приборы не были вытеснены более компактными полупроводниковыми. Тем не менее, и сегодня вакуумные приборы находят применение. Так, вакуумные лампы используются в космосе, в усилителях на радиостанциях и даже в микроволновках.

1) Как известно, лучшим способом вернуть в строй неработающий телевизор на лампах является достаточно сильный удар по его крышке сверху. Шутки остаются шутками, но вопрос: есть ли у этого явления физическое обоснование? Можно ли таким образом “исправить” полупроводниковый телевизор? Когда это применимо к ламповым?

2) Катод вакуумного диода имеет температуру $T = 1500K$. Определить плотность тока j через диод в отсутствии дополнительной разности потенциалов. Вакуумный диод представляет собой цилиндр, по центру которого натянута нить катода диаметром $d = 1$ мм. Анод представляет собой цилиндрическую пластину, находящуюся на расстоянии $\rho = 1$ см от катода. Концентрация электронов вблизи катода составляет
$n = 10^{13}$ м$^{-3}$.

3) При прогреве вакуумного диода была получена зависимость анодного тока от напряжения, поданного на клеммы катода для его разогрева. Чем примечательна данная характеристика? Где можно применять такой прибор?



4) Стенки анода ионизационного вакуумметра (применяется при работе с высоким вакуумом) выполняются в виде сетки.
а) С какой целью это было сделано?
б) Предположим, что для эксперимента был изготовлен прибор аналогичный ионизационному вакуумметру, но со сплошным анодом. Разность потенциалов между анодом и катодом составляет $U = 1100$ В. С катода эмитирует 10^{15} электронов в секунду. Какой была бы поглощенная доза излучения человеком массой 70 кг за 1 час, если бы электроны тормозились о сплошной анод? Принять, что в излучение переходит 1% кинетической энергии электрона до остановки.

9. Компьютерное моделирование

В наше время взгляд учёного обращён к объектам, выходящим за пределы возможности осязания их человеком: к звёздам и кваркам. Также человек стремится понять механизмы процессов, протекающих миллионы и миллиарды лет или длящихся фемтосекунды.

Но тут перед ним встает преграда: наука - дело экспериментальное. А значит, если ты не можешь провести эксперимент или хотя бы теоретически обосновать свои догадки о происхождении явления, то это уже философия. На помощь человеку в XX веке пришёл компьютер – мощнейший инструмент численного моделирования. Несмотря на то, что результаты, полученные в ходе эксперимента, могут не вполне совпадать с реальной жизнью из-за неправильной постановки задачи на компьютерном языке, если программа хорошо отлажена, то она имеет огромную предсказательную силу.

Моделированием физических процессов и явлений занимается вычислительная физика, представляющая собой объединение методов и техник из вычислительной математики, программирования и физики.

1) Напишите программу на любом доступном Вам языке программирования, которая моделирует движение Луны вокруг Земли. Рассмотрите её поведение на больших временах. Предположите, почему могут возникать ошибки и расхождения с наблюдаемым движением. В качестве решения предоставьте код программы с комментариями.

   На вход программа получает расстояние от Земли до Луны (млн км) и линейную скорость Луны (км/с) в начальный момент времени, а также момент времени, в который вы хотите узнать обновлённые положение и скорость.

2) Постройте график разности полной энергии Луны (К+П) в начальный момент времени и времени наблюдения τ от τ.

Физтех-школа электроники, фотоники и молекулярной физики

Московский физико-технический институт
Институтский переулок, 9, Долгопрудный, Россия
Дирекция: АК, 506, (498) 744-65-47
https://mipt.ru/education/departments/fefm
sepmp@phystech.edu