



# Республиканская физическая олимпиада 2020 год (Заключительный этап)

## Теоретический тур

### 11 класс.

1. Полный комплект состоит из трех заданий.
2. Для вашего удобства вопросы, на которые Вам необходимо ответить, помещены в рамки.
3. При оформлении работы каждое задание начинайте с новой страницы. При недостатке бумаги обращайтесь к организаторам!
3. Подписывать рабочие листы запрещается.
4. В ходе работы можете использовать ручки, карандаши, чертежные принадлежности, калькулятор.
5. Со всеми вопросами, связанными с условиями задач, обращайтесь к организаторам олимпиады.

Постарайтесь внимательно прочитать условия задач!

Может, вам покажется, что условия задач слишком длинные. Но мы сочинили их такими, чтобы Вам было легче решать. Поверьте, иногда решения короче таких условий! Не теряйте присутствия духа, смело беритесь за решение каждой задачи. Помните, оцениваются не только полные решения, но и их отдельные части и даже отдельные здравые мысли.

Пакет заданий содержит:

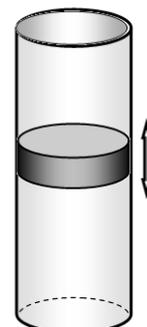
- титульный лист (стр. 1);
- условия 3 теоретических задач (стр. 2-7).

## Задание 11-1. Разминка

Задание состоит из 3 не связанных между собой задач.

### Задача 1.1

Вертикальный цилиндрический сосуд с газом закрыт массивным подвижным поршнем. Поршень может совершать малые гармонические колебания в вертикальном направлении. Если считать процесс сжатия-расширения газа изотермическим, то расчетное значение периода колебаний равно  $T_0$ .



1.1.1 Найдите, чему будет равен период колебаний поршня, если считать процесс сжатия-расширения газа адиабатическим. Показатель адиабаты газа -  $\gamma$

Подсказки.

1. Уравнение адиабатического процесса идеального газа имеет вид

$$PV^\gamma = const. \quad (1)$$

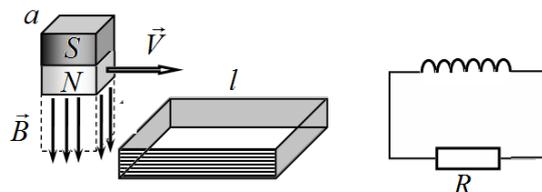
Где  $P$  - давление газа,  $V$  - его объем,  $\gamma$  - показатель адиабаты газа.

2. При  $x \ll 1$  и любых  $\beta$  справедлива приближенная формула

$$(1+x)^\beta \approx 1 + \beta x. \quad (2)$$

### Задача 1.2

Проволочная рамка содержит  $N$  витков. Рамка имеет форму квадрата со стороной длины  $l$ . Рамка подключена к резистору с сопротивлением  $R$ . Электрическим сопротивлением и индуктивностью рамки можно пренебречь.

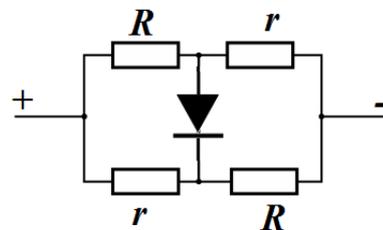


Над рамкой пролетает с постоянной скоростью  $\vec{V}$  постоянный магнит, поперечное сечение которого имеет форму квадрата со стороной  $a = \frac{l}{2}$ . Магнитное поле магнита существует только у торцов, причем его можно считать однородным, индукция этого поля равна  $B$  (см. рисунок).

1.2.1 Постройте график зависимости напряжения на резисторе от времени  $U(t)$  за время пролета магнита над рамкой. Укажите характерные точки этого графика.

### Задача 1.3

В схеме, показанной на рисунке, диод является идеальным: при прямом подключении (когда направление тока совпадает со «стрелкой» диода на схеме) его сопротивление пренебрежимо мало, при обратном подключении диода сопротивление бесконечно велико. При указанной на схеме полярности подключения источника общее сопротивление цепи равно  $R_1 = 8,0 \text{ Ом}$ , при изменении полярности источника сопротивление цепи становится равным  $R_2 = 9,0 \text{ Ом}$ .



1.3.1 Найдите, чему равны сопротивления резисторов  $R$  и  $r$  на схеме.



### Задание 11-2. «А все-таки она вертится!»

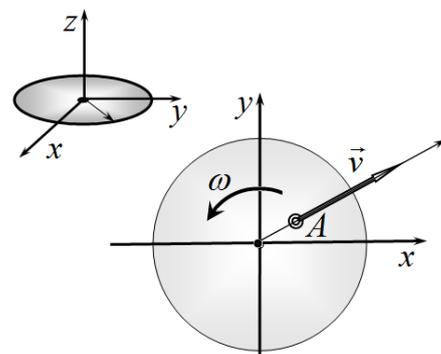
Доказать наличие вращения Земли вокруг своей оси можно, не сходя с ее поверхности. Существует целый ряд природных эффектов, которые наглядно подтверждают то, что Земля вращается. В данном задании рассматриваются два таких природных явления: преимущественное подмывание одного из берегов реки и западный перенос ветров в белорусских широтах.

Эрудированные, но не очень понимающие физики «спецы» для объяснения этих эффектов ссылаются на таинственную силу Кориолиса, но естественно, не могут объяснить, что это такое.

На самом деле все гораздо проще: достаточно перейти из неинерциальной вращающейся системы отсчета в привычную неподвижную (следовательно, инерциальную) систему отсчета и все становится почти очевидным. Учитывать движение Земли вокруг Солнца не следует.

#### Часть 1. Введение в понимание.

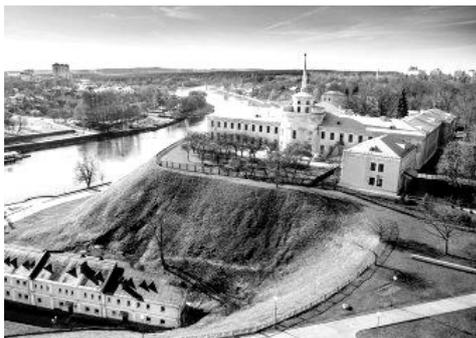
Рассмотрим диск, который вращается вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . По поверхности диска движется материальная точка  $A$  (например, жук). Будем описывать движение этого жука в инерциальной (неподвижной) системе отсчета  $XYZ$ , ось  $z$  которой совпадает с осью диска, а оси  $x$  и  $y$  лежат в плоскости диска.



Пусть жук движется относительно диска строго радиально (на диске нарисован радиус, и жук с него не сходит). Скорость жука относительно диска постоянна и равна  $\vec{v}$ .

- 1.1 В некоторый момент времени  $t$  жук находится на расстоянии  $r$  от центра диска. Нарисуйте вектор полной скорости жука в неподвижной системе отсчета (в плоскости  $XY$ ), разложите его на компоненты направленную вдоль радиуса и перпендикулярную ему. Укажите, чему равны модули этих компонент?
- 1.2 Нарисуйте вектор полной скорости жука скорости через малый промежуток времени  $\Delta t$ .
- 1.3 Найдите ускорение жука в неподвижной системе отсчета. Укажите направление вектора ускорения в момент времени  $t$ .
- 1.4 Какая сила может сообщить это ускорение жуку?

В дальнейших расчетах считайте Землю шаром радиуса  $R = 6400 \text{ км}$ , вращающимся вокруг собственной оси. Надеемся, что период вращения Земли вам известен. Действие происходит на территории Беларуси, поэтому считайте, что географическая широта местности  $\varphi = 50^\circ$ . Напоминаем, географическая широта экватора равна нулю, а Солнце восходит на востоке.



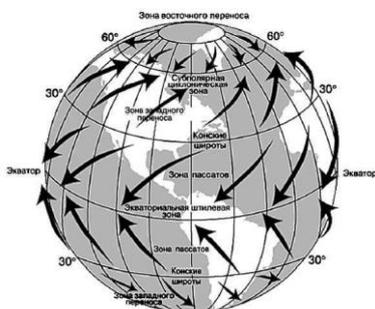
## Часть 2. Какой берег реки круче?

Будем считать, что река Днепр в Беларуси в Беларуси течет строго на юг, а река Неман строго на север. Русло каждой реки упрощенно будем считать прямоугольным желобом глубиной  $h = 5,0$  м и шириной  $l = 50$  м, скорость течения воды относительно поверхности Земли примем  $v = 2,0 \frac{м}{с}$ . Плотность воды

$$\rho = 1,0 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}.$$

- 2.1 Нарисуйте в проекции на плоскость экватора (вид со стороны Северного полюса) вектор полной скорости некоторой порции воды в неподвижной системе отсчета (оси которой лежат в плоскости экватора). Проведите разложение этого вектора на составляющие: вдоль проекции меридиана и вдоль параллели.
- 2.2 Прodelайте аналогичное построение вектора скорости через малый промежуток времени  $\Delta t$ .
- 2.3 Укажите, на какой берег (восточный, или западный; правый, или левый) вода действует с большей силой.
- 2.4 Рассчитайте разность давлений воды, действующих на разные берега реки.

Решение данной части задачи проведите отдельно для Днепра и для Немана. Обязательно укажите на рисунке восток и запад, и направление вращения Земли.



## Часть 3. Почему в Беларуси преобладает западный перенос воздушных масс

Известный факт: в Беларуси преобладает западный перенос воздушных масс. На вопрос: «В чем причина этого явления?» чаще всего можно получить ответ: «Причина – вращение Земли!» В целом ответ, конечно, верный, но последующие вопросы ставят испытуемого в тупик.

«Как Вы себе это представляете? Воздух остается на месте, а поверхность Земли вращается?» Если на этот вопрос Вы отвечаете: «Да, примерно так», то ответьте на следующие вопросы этого задания.

Итак, принимаем гипотезу: поверхность Земли воздух не увлекает: воздух остается на месте (относительно инерциальной неподвижной системы отсчета), а поверхность Земли вращается.

- 3.1 Оцените скорость ветра в Беларуси при справедливости высказанной гипотезы.
- 3.2 Укажите в каком направлении будет дуть этот ветер?

А теперь правильное объяснение. У поверхности Земли воздух разогревается сильнее всего вблизи экватора. Этот нагретый и влажный воздух поднимается в верхние слои атмосферы и растекается к полюсам. Достигнув наших средних широт, он, охладившись, начинает опускаться к поверхности Земли.

- 3.3 Укажите в каком направлении будет дуть этот ветер?
- 3.4 Какова была скорость ветра, если бы вязкость ветра отсутствовала?



### Задание 11-3. Фазированная антенная решетка – глаза радиолокационной системы

Небольшая справка:

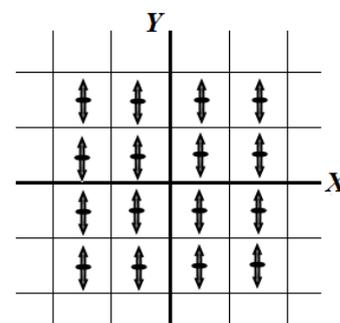
Отдельный радиотехнический узел «Ганцевичи» (Барановичи)», находящийся в 48 км юго-восточнее города Барановичи. Узел является войсковой частью Воздушно-космических сил России и оснащен стационарной цифровой радиолокационной станцией дециметрового диапазона типа «Волга». «Волга» обеспечивает слежение за ракетными пусками вероятного противника на дальности до 4800 км и наблюдение за космическими объектами миллиметровых размеров на любой из орбит. С

помощью «Волги» осуществляются обнаружение баллистических ракет и космических объектов и контроль над районами патрулирования подлодок стран НАТО в Европе, Северной Атлантике и Норвежском море. Объект входит в систему раннего предупреждения о ракетном нападении и замыкается, в конечном счете, на так называемый «ядерный чемоданчик» президента России.

На фотографии показана эта радиолокационная станция (восхититесь ее размерами). Самое поразительное в ее работе то, что сама антенна неподвижна, а посылаемый ею луч может направляться в различных направлениях. Цель данного задания разобраться в принципе работы такого устройства. Подробное описание станции засекречено, поэтому используемая в данной работе модель может отличаться от реальной.

#### Общее описание и теоретическое введение.

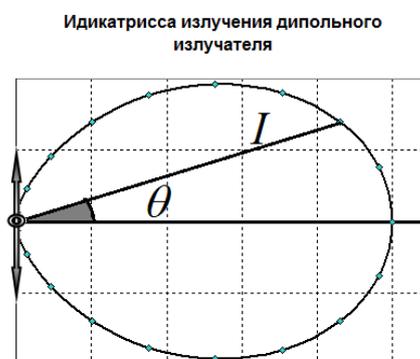
1. Антенна станции представляет собой плоскую квадратную решетку. Длину стороны каждой квадратной ячейки обозначим  $d$ . В центре каждой ячейки расположен дипольный излучатель радиоволн. Все источники являются монохроматическими и когерентными. Длина волны излучения равна  $\lambda = 40$  см. Введем систему координат в плоскости антенны  $XU$  (см. рис.). Будем считать, что оси дипольных излучателей ориентированы вдоль оси  $U$ . С помощью электроники и соответствующего программного обеспечения можно регулировать фазу колебаний каждого излучателя.



2. Для одиночного излучателя зависимость интенсивности излучения от угла  $\theta$  между нормалью к оси излучателя и направлением излучения (такая зависимость называется индикатрисой излучения) описывается функцией

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (1)$$

График этой функции в полярных координатах показан на рисунке. Далее величину  $I_0$  считайте известной.



3. При выполнении данного задания вам необходимо суммировать волны, излучаемые всеми излучателями (рассчитывать результат интерференции волн). Следует считать, что расстояние до точки в которой происходит суммирование колебаний значительно больше размеров антенны.

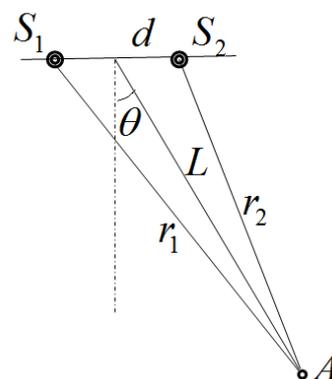
4. Докажите формулу, которая во многом является основой дальнейших расчетов.

Пусть расстояние между двумя источниками  $S_1$  и  $S_2$  равно  $d$ . Точка  $A$ , в которой происходит сложение волн, испущенных источником, равно  $L$ , и эта точка находится в направлении, задаваемом углом  $\theta$  (см. рис.).

Покажите, что разность расстояний от источников до рассматриваемой точки при  $L \gg d$  определяется по формуле

$$\Delta r = r_1 - r_2 = d \sin \theta. \quad (2)$$

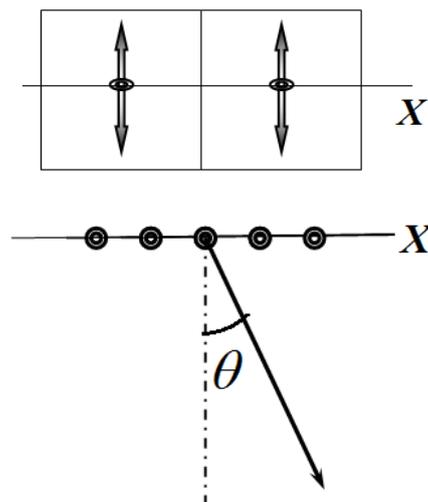
В дальнейшем используйте эту формулу.



### Часть 1. Два излучателя.

Рассмотрим два соседних излучателя решетки расположенных вдоль оси  $X$  решетки. Требуется рассчитать излучение в плоскости перпендикулярной осям излучателей в зависимости от угла  $\theta$  между нормалью к плоскости излучателей и направлением, в котором рассчитывается интенсивность излучения. Понятно, что рассматриваемый диапазон углов  $\theta$ : от  $-\frac{\pi}{2}$  до  $+\frac{\pi}{2}$ . Так антенна излучает только в одну сторону.

На следующем рисунке показан этот угол (вид сверху). Здесь изображено несколько ( $N$ ) излучателей, чтобы этот же рисунок был пригоден для следующей части задачи, в этой части  $N = 2$ .

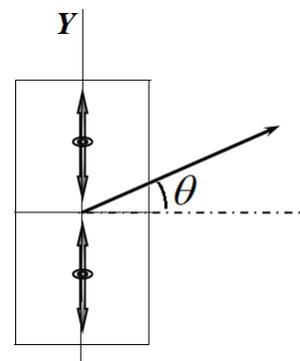


1.1 Найдите зависимость  $I(\theta)$  интенсивности излучения двух излучателей от угла  $\theta$ , если разность фаз колебаний на источниках равна  $\Delta\varphi = 0$ .

1.2 Найдите значения углов  $\theta$ , для которых интенсивность излучения будет максимальна.

1.3 Укажите, при каком максимальном значении расстояния между излучателями  $d$ , зависимость  $I(\theta)$  будет иметь только один максимум.

1.4 Ответьте на вопросы 1.1-1.3 для двух излучателей расположенных вдоль оси  $Y$ .



## Часть 2. Цепочка излучателей.

Рассмотрим одномерную цепочку из  $N$  излучателей, расположенных вдоль оси  $X$ . Расстояние между соседними излучателями равно  $d = 0,80\lambda$ . Сначала будем считать, что все излучатели колеблются в одной фазе.

- 2.1 Укажите направление (или направления) в которых интенсивность излучения цепочки максимальна. Чему равна эта максимальная интенсивность?  
2.2 Найдите угловую ширину  $\Delta\theta$  луча локатора, в пределах которого излучается основная доля энергии.

Подсказка. В качестве предельного значения угла следует брать направление, в котором интенсивность становится равной нулю.

Теперь будем считать, что между колебаниями соседних излучателей создается одинаковая разность фаз  $\Delta\varphi$ .

- 2.3 Найдите значения углов  $\theta$  в направлении, которых интенсивность излучения будет максимальна.  
2.4 Рассчитайте чему равна угловая ширина луча радара, если его максимальная интенсивность направлена под углом  $\theta_0$ .  
2.5 Определите, по какому временному закону  $\Delta\varphi(t)$  должна изменять разность фаз между колебаниями соседних излучателей, чтобы луч радара поворачивался с постоянной угловой скоростью  $\omega$ .

- 2.6 Квадратная антенна содержит  $N \times N$  излучателей, каждый из которых создает интенсивность  $I_0$ . Чему равна максимальная интенсивность излучения всей антенны?