87-я Московская олимпиада школьников по физике
2026 год
8 класс

1. Wideröe linac (7 баллов)

Один из первых ускорителей заряженных частиц — линейный ускоритель Видероэ на дрейфовых трубках — состоит из последовательности полых проводящих трубок, разделённых узкими зазорами. Электрическое поле может существовать только в зазорах. Внутри трубок поле отсутствует, и ускоряемая частица движется по инерции

Поле в зазорах меняется периодически: в течение времени τ оно направлено вдоль движения частицы (режим ускорения), а в течение следующего интервала времени τ — противоположно этому направлению (режим торможения). В момент $t = 0$ покоящаяся частица массы m начинает движение в первом зазоре. Известно, что в этом зазоре её скорость равномерно увеличивается в течение всего первого интервала τ, так что к моменту входа в первую трубку частица приобретает кинетическую энергию E. Все последующие зазоры считаются настолько узкими, что частица пролетает их практически мгновенно; при этом в каждом из них её кинетическая энергия также увеличивается на величину E.

Для эффективной работы ускорителя необходимо, чтобы каждый следующий зазор частица проходила точно в момент начала режима ускорения.

- Найдите расстояние x_0, которое частица проходит в первом зазоре до входа в первую трубку.
- Каким должно быть отношение длин трубок $L_1 : L_2 : \cdots : L_n$, если требуется, чтобы при заданном числе этапов ускорения общая длина установки была минимальной?

2. Цилиндры (14 баллов)

Есть два цилиндрических геометрически подобных сосуда, изготовленных из одного и того же материала, плотность которого больше плотности воды. Сосуды тонкостенные, но с массивным дном. Их линейные размеры относятся как 2 : 1. Больший сосуд стоит на горизонтальном столе и заполнен водой; в нём плавает (естественно, не касаясь дна) меньший сосуд, также заполненный водой. Известно, что объём воды в каждом сосуде составляет одну и ту же долю его внутреннего объёма. Толщина дна каждого сосуда равна $\frac{1}{k}$ его высоты, где $k > 1$. Плотность воды равна 1000 кг/м^3.

- Пусть $k = 4$. Определите диапазон возможных значений плотности ρ материала сосудов.
- При каких значениях k не существует ответа на вопрос предыдущего пункта?
- Предположим, что число сосудов увеличилось до N. N-й сосуд стоит на столе и заполнен водой; в нём плавает $(N-1)$-й сосуд, в нём — $(N-2)$-й и так далее. Линейные размеры сосудов относятся как $N : (N-1) : (N-2) : \cdots : 2 : 1$. Объём воды в каждом сосуде составляет одну и ту же долю его внутреннего объёма.

  Утверждается, что при заданном значении k ($k > 2$) и некотором значении ρ ($\rho > \rho_0$) такая система сосудов может существовать в равновесии (возможно, неустойчивом) для любого $N \geqslant 3$.

  Верно ли это утверждение?

Примечание. При решении может оказаться полезной формула для суммы кубов натуральных чисел

$$1 + 8 + 27 + \ldots + n^3 = \sum_{a=1}^{n} a^3 = \frac{n^2(n+1)^2}{4}.$$

3. Кризис кипения (9 баллов)

В обычном (пузырьковом) режиме кипения тепло отводится от поверхности нагревателя за счёт парообразования и интенсивного перемешивания жидкости, возникающего при росте и отрыве пузырьков. Однако при достаточно большой мощности нагревателя режим кипения меняется: образование пара становится столь интенсивным, что пузырьки сливаются друг с другом, формируя на поверхности нагревателя сплошную паровую плёнку. Такая смена режима кипения называется кризисом кипения.

Поскольку коэффициент теплоотдачи через паровой слой на два порядка меньше, чем при пузырьковом кипении, стационарный режим теплопередачи нарушается: при неизменной мощности нагрева температура нагревательного элемента начинает неконтролируемо расти. Это приводит к его разрушению — так называемому «пережогу стенки».

Согласно гидродинамической теории С. С. Кутателадзе, критическое состояние наступает, когда интенсивный поток образующегося пара начинает препятствовать доступу жидкости к поверхности нагревателя. Проще говоря, этот поток действует на воду подобно сильному встречному ветру.

Динамическое давление такого «пара-ветра» определяется формулой:

$$P = \frac{\rho u^2}{2},$$

где u — скорость пара, образующегося у поверхности нагревателя, а ρ — его плотность.

Продолжение задания см. на листе 2

Кризис кипения наступает, когда динамическое давление пара достигает некоторого значения $P_{\text{крит}}$, при котором оно сравнивается с давлением, обусловленным силами поверхностного натяжения и тяжести, стремящимися «протолкнуть» воду обратно к поверхности нагревателя сквозь поток пара. Величину критического динамического давления для воды можно считать равной $P_{\text{крит}} \approx 20$ Па.

Рассмотрим сосуд с плоским нагревательным элементом площадью 80 см^2 (похожий на электрочайник). Вода в сосуде нагрета до температуры, близкой к $100\,^\circ$C; плотность пара при этой температуре и нормальном атмосферном давлении $\rho = 0{,}6$ кг/м^3. Удельная теплота парообразования $L = 2{,}26$ МДж/кг.

- При какой мощности W_0, подводимой к нагревателю, наступает кризис кипения?
- Пусть к нагревателю подводится мощность $1{,}1W_0$. До какой температуры теоретически (!) может разогреться нагреватель, если коэффициент теплоотдачи от стенки к воде через паровой слой равен $\alpha = 200$ Вт/(м$^2\cdot{}^\circ$C)? Мощность теплопередачи определяется формулой

$$W = \alpha \cdot S \cdot \Delta T,$$

где S — площадь нагревателя, а ΔT — так называемый «перегрев стенки», то есть разность температур нагревательного элемента и воды в сосуде.

- Теперь к нагревателю подводится мощность W, значительно меньшая W_0. За какое время выкипит электрический чайник с таким нагревателем и сломанным терморегулятором, содержащий 1 кг воды при температуре кипения, если перегрев стенки составляет $5\,^\circ$C? Коэффициент теплопередачи для воды при развитом пузырьковом кипении равен $\alpha = 5 \cdot 10^4$ Вт/(м$^2\cdot{}^\circ$C).

4. Нелинейная верёвка (10 баллов)

В лаборатории исследуют свойства особой многожильной верёвки, сплетённой из волокон разных типов. Для описания свойств такой верёвки удобно использовать *дифференциальную жёсткость* k, которая определяется как отношение малого изменения силы упругости ΔF к вызванному им малому изменению удлинения Δx:

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta x}.$$

В лаборатории имеется большое количество образцов — отрезков исследуемой верёвки одинаковой длины. Всякий раз эксперимент проводят с новым образцом.

В опытах первого типа образец закрепляют и плавно увеличивают его растяжение x, измеряя возникающую силу натяжения F. Полученные данные свидетельствуют, что при достижении пороговых значений удлинения (в моменты разрыва внутренних волокон того или иного типа) сила натяжения скачкообразно уменьшается. Разорванные волокна при снятии нагрузки не восстанавливаются. На рис. 1 приведён график зависимости k от силы натяжения F (полужирные линии чёрного цвета), построенный по результатам этого исследования.

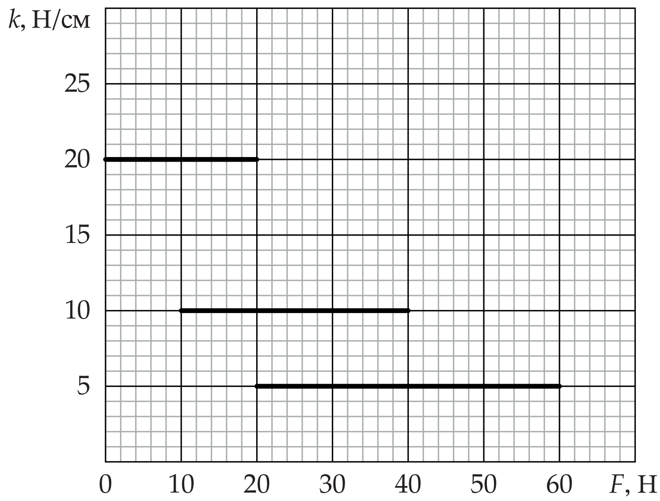

Рис. 1

- Используя график $k(F)$, восстановите зависимость силы от удлинения $F(x)$ для процесса *растяжения* образца. Постройте график $F(x)$, отметив на осях значения в характерных точках.

В опытах второго типа один конец образца закрепляют, а к другому подвешивают лёгкое ведро. В ведро начинают равномерно подсыпать песок, так что его вес увеличивается линейно со временем. Через 30 мин вес достигает 50 Н, после чего песок начинают так же равномерно удалять до полного опустошения ведра (что занимает ещё 30 мин). Установка оснащена специальным демпфером, который мгновенно гасит колебания ведра при разрывах волокон.

- Изобразите идеализированный график зависимости удлинения образца x от времени t на протяжении всех 60 мин эксперимента, полагая, что система в любой момент времени находится в положении равновесия.