

# Виртуальный курс физики

# МОЛЕКУЛЯРНАЯ

# ФИЗИКА

# И ТЕРМОДИНАМИКА

Основы термодинамики. Задачи для  
самостоятельного решения





# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

## Основы термодинамики

### Рекомендации по решению задач

Все задачи термодинамики можно условно разделить на пять групп.

*Первая группа.* В задаче рассматриваются процессы теплообмена в изолированной системе тел, в которых в результате уменьшения внутренней энергии одних тел увеличивается внутренняя энергия других. Эти задачи решаются с привлечением уравнений

$$Q = cm(T_2 - T_1) = cm\Delta T = \frac{m}{\mu} C_\mu \Delta T,$$

$$Q = \lambda m, \quad Q = rm, \quad Q = qm.$$

Рекомендуется следующий порядок решения этих задач:

- 1) внимательно изучив условие задачи, следует установить, какие тела нагреваются, а какие остывают, обратив особое внимание на то, не происходят ли в процессе теплообмена агрегатные превращения тел;
- 2) составить уравнение теплового баланса в виде

$$\sum_{i=1}^N Q_i = 0,$$

либо в виде

$$\sum_{i=1}^{N_1} Q_{\text{отд}} = \sum_{i=1}^{N_2} Q_{\text{получ}},$$

где  $\sum_{i=1}^{N_1} Q_{\text{отд}}$  – количество теплоты, выделяющееся при остывании охлаждающихся тел;  $\sum_{i=1}^{N_2} Q_{\text{получ}}$  – количество теплоты, поглощаемое нагревающимися телами.

Используя это уравнение, необходимо иметь в виду, что в формуле

$$Q = cm(T_2 - T_1) = cm\Delta T = \frac{m}{\mu} C_\mu \Delta T$$

для нахождения  $\Delta T$  из большей температуры следует всегда вычитать меньшую.

*Вторая группа.* В задаче рассматриваются процессы, связанные с превращением одного вида энергии в другой. При этом внутренняя энергия тела изменяется вследствие совершения работы над телом или самим телом при отсутствии теплообмена. Эти задачи решаются с участием уравнения

$$A = -\Delta U.$$

Рекомендуется такой порядок решения подобных задач:

- 1) анализируя условие задачи, следует убедиться в том, что теплообмен с внешней средой действительно отсутствует ( $Q = 0$ );
- 2) выяснить, работу совершает само тело или работа совершается над ним. Это влияет на знак в выражении  $A = -\Delta U$ ;
- 3) если условием задается КПД процесса, то необходимо тщательно вникнуть в смысл задачи. Если часть внутренней энергии тела идет на совершение телом работы, то уравнение  $A = -\Delta U$  записывают в виде  $\eta\Delta U = A$ . Если же часть работы, совершенной над телом, идет на увеличение его внутренней энергии, равенство  $A = -\Delta U$  принимает вид  $\Delta U = \eta A$ ;
- 4) подставить в уравнение  $A = -\Delta U$  выражения для  $A$  и  $\Delta U$  и найти неизвестную величину.

*Третья группа.* В задачах рассматривается процесс передачи телу или системе тел некоторого количества теплоты, в результате чего изменяется внутренняя энергия тела и совершается работа. Как правило, объектом, получающим теплоту, является идеальный газ, изменяющий состояние изобарно либо изохорно. Если  $p = \text{const}$ , то газ при расширении совершает работу (или работа совершается над газом при его сжатии), вычисляемую по формуле

$$A = p(V_2 - V_1) = p\Delta V.$$

В случае если  $V = \text{const}$  ( $\Delta V = 0$ ), газ работы не совершает. Количество теплоты в обоих случаях вычисляют по формуле

$$Q = cm(T_2 - T_1) = cm\Delta T = \frac{m}{\mu} C_{\mu} \Delta T,$$

в которой в первом случае ( $p = \text{const}$ )  $c = c_p$  – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, а во втором случае  $c = c_V$  – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме. Порядок решения задач третьей группы аналогичен порядку решения задач первых двух групп.

*Четвертая группа.* К этой группе можно отнести комбинированные задачи, при решении которых к уравнению  $Q = \Delta U + A$  добавляют

необходимые соотношения из механики, молекулярной физики или электродинамики.

*Пятая группа.* В задачах рассматриваются процессы, происходящие в тепловых машинах. При решении этих задач следует внимательно проанализировать исходные данные и применить формулы

$$\eta = \frac{A}{Q_1} \cdot 100\% = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%,$$

или

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%,$$

не забыв выразить температуру нагревателя и холодильника в единицах абсолютной температурной шкалы.

### Основные законы и соотношения

$$U = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{\mu} RT,$$

$$\text{или } U = \frac{3}{2} pV$$

– внутренняя энергия одноатомного идеального газа;  $m$  – масса газа;  $\mu$  – его молярная масса;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $V$  – объем газа;  $T$  – температура.

$$A = p\Delta V,$$

$$\text{или } A = \frac{m}{\mu} R\Delta T$$

– работа, совершаемая газом при изобарическом расширении;  $\Delta V = V_2 - V_1$  – изменение объема;  $m$  – масса газа;  $\mu$  – его молярная масса;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $\Delta T = T_2 - T_1$  – изменение температуры.

$$Q = cm\Delta T$$

– количество теплоты, необходимое для нагревания вещества массой  $m$  с удельной теплоемкостью  $c$  на  $\Delta T$ ;  $\Delta T = T_2 - T_1$  – изменение температуры.

Первый закон термодинамики:

$$Q = \Delta U + A,$$

$$\Delta U = A' + Q$$

– количество теплоты, переданное системе;  $\Delta U = U_2 - U_1$  – изменение внутренней энергии системы;  $A$  – работа системы против внешних сил;  $A'$  – работа внешних сил над системой ( $A' = -A$ ).

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

– КПД теплового двигателя;  $Q_1$  – количество теплоты, переданное нагревателем рабочему телу;  $Q_2$  – количество теплоты, отданное рабочим телом холодильнику.

$$\eta_k = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

– КПД теплового двигателя, работающего по циклу Карно;  $T_1$  и  $T_2$  – абсолютные температуры нагревателя и холодильника.

### Задачи для самостоятельного решения

1. В двух закрытых баллонах содержится 1 моль идеального одноатомного газа. Внутренняя энергия газа в первом баллоне равна 8 кДж, во втором – 12 кДж. Во сколько раз абсолютная температура газа во втором баллоне больше, чем в первом?

*Ответ:* в 1,5 раза.

2. В некотором процессе газ совершил работу 5 МДж, а его внутренняя энергия уменьшилась на 2 МДж. Какое количество теплоты передано газу в этом процессе?

*Ответ:* 3 МДж.

3. Два грамма гелия, расширяясь адиабатически, совершили работу, равную 300 Дж. Найти изменение температуры гелия в этом процессе, если его молярная масса равна 0,004 г/моль.

*Ответ:* – 48 К.

4. Баллон емкостью 50 л содержит аргон под давлением 200 кПа. Каким будет давление газа, если ему сообщить 3 кДж теплоты? Объем баллона остается неизменным. Ответ привести в килопаскалях.

*Ответ:* 240 кПа.

5. При нагревании одноатомного идеального газа на 7 К его внутренняя энергия увеличилась на 348,6 Дж. Определить количество вещества.

*Ответ:* 4 моля.

6. При каком процессе внутренняя энергия газа уменьшилась на 5 кДж, если он совершил работу 5 кДж?

*Ответ:* при адиабатическом.

7. Два теплоизолированных сосуда соединены трубкой с закрытым краном. В первом сосуде содержится 2 моля гелия при температуре 200 К, во втором – 3 моля этого газа при температуре 300 К. Определить абсолютную температуру в сосудах, если кран открыть.

*Ответ:* 260 К.

8. В осях  $V, p$  график процесса в идеальном одноатомном газе имеет вид прямой, соединяющей точки (0,8 л, 100 кПа) и (1 л, 80 кПа). Определить минимальное значение внутренней энергии газа в ходе процесса. Масса газа постоянна.

*Ответ:* 120 Дж.

9. Вычислить изменение внутренней энергии 2 молей идеального газа при изменении его температуры от 300 до 307 К. Газ считать одноатомным.

*Ответ:* 174,3 Дж.

10. Внутренняя энергия идеального одноатомного газа, находящегося в баллоне объемом 0,02 м<sup>3</sup>, равна 600 Дж. Определить давление газа. Ответ привести в килопаскалях.

*Ответ:* 20 кПа.

11. При изменении состояния идеального одноатомного газа его объем увеличился в три раза, а давление уменьшилось в 1,5 раза. Во сколько раз внутренняя энергия конечного состояния больше внутренней энергии начального состояния?

*Ответ:* в два раза.

12. На диаграмме  $T, V$  график процесса представляет собой прямую, проходящую через точки с координатами (250 К, 0,1 м<sup>3</sup>) и (250 К, 0,2 м<sup>3</sup>). Определить изменение внутренней энергии идеального газа в ходе процесса. Масса газа постоянна.

*Ответ:* 0.

13. Идеальный одноатомный газ с плотностью 4 кг/м<sup>3</sup> находится в сосуде под давлением 80 кПа. Определить энергию теплового движения молекул газа, если масса газа равна 1 кг. Ответ привести в килоджоулях.

*Ответ:* 30 кДж.

14. В ходе некоторого процесса давление и объем газа изменяются таким образом, что  $pV^3 = \text{const}$ . Во сколько раз уменьшится внутренняя энергия идеального одноатомного газа при увеличении объема вдвое? Масса газа постоянна.

*Ответ:* в четыре раза.

15. Термоизолированный сосуд, содержащий некоторое количество гелия, движется со скоростью 249 м/с. На сколько градусов изменится температура газа в сосуде, если его внезапно остановить? Молярная масса гелия равна  $4 \cdot 10^{-3}$  кг/моль. Теплоемкостью сосуда следует пренебречь.

*Ответ:* 9,96 К.

16. На сколько градусов следует нагреть 6 молей идеального газа, чтобы он совершил работу, равную 124,5 Дж? Давление газа постоянное.

*Ответ:* 2,5 К.

17. Какое количество вещества одноатомного идеального газа можно нагреть на 5 К, подведя к нему 41,5 Дж теплоты? Давление газа постоянно.

*Ответ:* 0,4 моля.

18. При изобарическом нагревании с 300 до 350 К газ совершил работу, равную 100 Дж. Какую работу совершил газ при последующем изобарическом нагревании на 25 К? Давление и масса газа постоянны.

*Ответ:* 50 Дж.

19. Какую работу совершает идеальный газ в ходе циклического процесса, если из окружающей среды к газу поступает количество теплоты, равное 47 Дж?

*Ответ:* 47 Дж.

20. В начальном состоянии температура газа равна 295 К. В конечном состоянии газ занимает объем 1 л при температуре 300 К. Определить работу газа в ходе процесса, если давление в нем постоянно и равно 300 кПа.

*Ответ:* 5 Дж.

21. Идеальный газ нагрели на 20 К при постоянном давлении и он совершил работу 249 Дж. Сколько молей газа нагревали?

*Ответ:* 1,5 моля.

22. Сколько молей одноатомного газа нагрели на 10 К, если количество подведенной теплоты равно 249 Дж? Процесс изохорический.

*Ответ:* 2 моля.

23. График процесса, происходящего в газе, на диаграмме  $p, V$  представляет собой прямую, проходящую через точки с координатами (100 кПа, 0,01 м<sup>3</sup>) и (150 кПа, 0,015 м<sup>3</sup>). Определить работу газа при изменении объема от 0,01 до 0,015 м<sup>3</sup>.

*Ответ:* 625 Дж.



24. Пять молей идеального газа нагревают на 10 К так, что температура меняется пропорционально квадрату его объема. Какую работу совершает газ при нагревании?

*Ответ:* 207,5 Дж.

25. При изотермическом расширении 2 молей идеального газа ему сообщено количество теплоты, равное 249 Дж. Затем газ вернули в начальное состояние путем изобарического сжатия и изохорического нагревания. Работа газа за цикл равна 83 Дж. Определить разность максимальной и минимальной температур газа в цикле.

*Ответ:* 10 К.

26. В ходе процесса, происходящего с постоянной массой идеального газа, давление газа меняется обратно пропорционально его объему. Какую работу совершил газ, если в ходе процесса ему сообщено количество теплоты, равное 23 Дж?

*Ответ:* 23 Дж.

27. В ходе изотермического расширения при увеличении объема от 0,5 до 0,7 л газу сообщили количество теплоты, равную 30 Дж. При последующем изотермическом расширении газ совершил работу 10 Дж. Определить работу газа в ходе всего процесса.

*Ответ:* 40 Дж.

28. В координатах  $p, V$  график циклического процесса представляет собой прямые, соединяющие точки (200 кПа, 1 л), (100 кПа, 2 л), (100 кПа, 1 л). Определить абсолютное значение работы, совершаемой газом за цикл.

*Ответ:* 50 Дж.

29. Идеальный одноатомный газ с постоянной массой переводят из начального состояния в конечное. Давление и объем начального состояния равны 200 кПа и 2 л, конечного – 100 кПа и 4 л. Определить изменение внутренней энергии газа в процессе перехода.

*Ответ:* 0 Дж.

30. На диаграмме  $T, V$  график процесса представляет собой прямую, соединяющую точки (300 К, 0,1 л), (600 К, 0,2 л). Определить работу 1 моля идеального газа при расширении объема от 0,1 до 0,2 л.

*Ответ:* 2490 Дж.

31. Во сколько раз работа, совершаемая газом при изобарическом расширении с давлением 300 кПа, больше работы, совершаемой им при том же расширении с давлением 100 кПа, если изменение объема в обоих случаях одинаково?

*Ответ:* в три раза.

32. Какую работу совершает газ, расширяясь изобарически при давлении 200 кПа от 1,6 до 2,5 л?

*Ответ:* 180 Дж.

33. Один моль гелия нагревают при постоянном давлении от температуры 100 К. Какое количество теплоты необходимо сообщить газу, чтобы его объем утроился?

*Ответ:* 4160 Дж.

34. В процессе изобарического нагревания гелия к нему было подведено количество теплоты, равное 300 Дж. Определить работу, совершенную этим газом.

*Ответ:* 120 Дж.

35. Один моль идеального газа при температуре 300 К изохорически охлаждается так, что его давление падает в три раза. Затем газ изобарически расширяется до установления начальной температуры. Определить работу газа в ходе всего процесса.

*Ответ:* 1660 Дж.

36. Один моль идеального газа изобарически нагревают так, что его объем возрастает в 1,5 раза. Определить работу газа в этом процессе, если его начальная температура равна 200 К.

*Ответ:* 830 Дж.

37. Определить работу, совершаемую 1 молем идеального газа при изохорическом нагревании от 300 до 400 К. Газ одноатомный.

*Ответ:* 0 Дж.

38. При расширении газ совершил работу, равную 15 Дж. Найти изменение его внутренней энергии, если количество теплоты, подведенной к газу, равно 32 Дж.

*Ответ:* 17 Дж.

39. Газ с постоянным объемом нагревают. Какое количество теплоты следует подвести к 1 молю газа, чтобы его температура возросла на 10 К? Газ считать одноатомным.

*Ответ:* 124,5 Дж.

40. Вычислить количество теплоты, необходимое для нагревания 2 молей идеального газа на 10 К при постоянном давлении, если при этом им совершена работа 166 Дж. Газ одноатомный.

*Ответ:* 415 Дж.

41. Идеальный одноатомный газ находится в закрытом баллоне емкостью 5 л. Какое количество теплоты необходимо сообщить газу, чтобы повысить его давление на 20 кПа?

*Ответ:* 150 Дж.

42. Два моля идеального одноатомного газа расширяются без теплообмена с окружающей средой. Температура газа в ходе расширения уменьшилась на 10 К. Определить работу, совершенную им при расширении.

*Ответ:* 249 Дж.

43. При подведении к 2 молям идеального одноатомного газа 300 Дж теплоты его температура увеличилась на 10 К. Какую работу совершил при этом газ?

*Ответ:* 51 Дж.

44. Какую работу требуется приложить к 2 молями идеального одноатомного газа, если его температура увеличилась на 20 К? Газ теплоизолирован.

*Ответ:* 498 Дж.

45. При изобарическом нагревании идеального одноатомного газа его внутреннюю энергию увеличили на 120 Дж. Определить работу, совершенную газом.

*Ответ:* 80 Дж.

46. Один моль идеального одноатомного газа при температуре 300 К изохорически охлаждается так, что его давление падает в три раза. Определить количество отданной газом теплоты.

*Ответ:* 2490 Дж.

47. При адиабатическом сжатии температура гелия возросла на 2 К. Определить массу газа, если при сжатии была совершена работа 996 Дж. Молярная масса гелия равна 4 г/моль. Ответ привести в граммах.

*Ответ:* 160 г.

48. В закрытом сосуде объемом 2 л находится гелий, плотность которого равна  $2 \text{ кг/м}^3$ . Какое количество теплоты необходимо сообщить гелию, чтобы повысить его температуру на 10 К? Гелий считать идеальным газом.

*Ответ:* 124,5 Дж.

49. Найти количество теплоты, необходимое для нагревания 1 моля одноатомного идеального газа на 20 К при постоянном давлении.

*Ответ:* 415 Дж.

50. При адиабатическом расширении газом совершена работа, равная 53 Дж. Определить разность внутренней энергии газа в конце и начале процесса.

*Ответ:* –53 Дж.

51. Для повышения температуры некоторой массы одноатомного газа на  $\Delta T$  при постоянном давлении необходимо сообщить газу  $Q$  джоулей теплоты. Какое количество теплоты следует отнять у этого газа при постоянном объеме, чтобы его температура понизилась на  $\Delta T$ ?

*Ответ:* 0,6  $Q$ .

52. Некоторая масса идеального одноатомного газа расширялась вначале изотермически, а затем изобарически. В процессе расширения газ получил 800 Дж теплоты и, расширяясь изотермически, совершил работу 400 Дж. Найти изменение внутренней энергии газа.

*Ответ:* 240 Дж.

53. Максимальный коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины равен 25 %. Определить по абсолютной шкале температуру холодильника, если температура нагревателя равна 400 К.

*Ответ:* 300 К.

54. Коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины равен 0,2. Какое количество теплоты получает за цикл холодильник, если при этом машина совершает работу 100 Дж?

*Ответ:* 400 Дж.

55. Определить коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины, если количество теплоты, полученное от нагревателя за цикл, равно 500 Дж, а количество теплоты, переданное холодильнику, составляет 400 Дж. Ответ привести в процентах.

*Ответ:* 20 %.

56. Какую долю составляет разность температур нагревателя и холодильника идеальной тепловой машины от температуры нагревателя, если максимальный коэффициент полезного действия машины равен 17 %?

*Ответ:* 0,17.

57. Определить разность температур нагревателя и холодильника идеальной тепловой машины, если температура нагревателя 400 К, а максимальный коэффициент полезного действия равен 20 %.

*Ответ:* 80 К.

58. Определить коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины, температура холодильника которой равна 300 К, а разность температур нагревателя и холодильника 100 К. Ответ привести в процентах.

*Ответ:* 25 %.

59. Определить коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины, если температура нагревателя равна 400 К, а температура холодильника 300 К. Ответ привести в процентах.

*Ответ:* 25 %.

60. Максимальный коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины равен 20 %. Определить по абсолютной шкале температуру нагревателя, если температура холодильника составляет 300 К.

*Ответ:* 375 К.

61. Коэффициент полезного действия тепловой машины равен 15 %. Какое количество теплоты передано от нагревателя рабочему веществу за время, в которое машиной совершена полезная работа, равная 150 Дж?

*Ответ:* 1000 Дж.

62. Идеальная тепловая машина совершает за цикл работу, равную 100 Дж. Какое количество теплоты получено при этом от нагревателя, если коэффициент полезного действия машины составляет 0,2.

*Ответ:* 500 Дж.

63. Коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины равен 0,1. Какую полезную работу совершает машина за цикл, если холодильнику при этом передается 900 Дж теплоты?

*Ответ:* 100 Дж.

64. Тепловая машина работает по циклу Карно, и ее КПД равен 60 %. Во сколько раз количество теплоты, полученное при изотермическом расширении рабочего вещества, больше количества теплоты, отданного при изотермическом сжатии?

*Ответ:* в 2,5 раза.