

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
Отделение естественных наук ШБИП

---

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ШБИП  
\_\_\_\_\_ Д.В. Чайковский  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

**О.Г. Ревинская, Н.С. Кравченко**

## **ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА**

Учебно-методическое пособие по изучению моделей физических  
процессов и явлений на компьютере  
с помощью лабораторной работы № МодТ–06  
для студентов всех специальностей

Издательство  
Томского политехнического университета  
2022

УДК 53(076.5)  
ББК 22.3я73  
Р321

**Ревинская О.Г.**

Р321      Законы идеального газа: учебно-методическое пособие по изучению моделей физических процессов и явлений на компьютере с помощью лабораторной работы № МодТ–06 для студентов всех специальностей / О.Г. Ревинская, Н.С. Кравченко; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2022. – 39 с.

**УДК 53(076.5)**  
**ББК 22.3я73**

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к изданию методическим семинаром отделения естественных наук ШБИП  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Зав. ОЕН ШБИП  
проф., доктор физ.-мат. наук

В.П. Кривобоков

Председатель учебно-методической комиссии

С.И. Борисенко

*Рецензент*

доктор физ.-мат. наук, доцент Томского политехнического университета  
*К.Б. Коротченко*

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2002–2022  
© Ревинская О.Г., Кравченко Н.С., 2002–2022  
© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2022

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № МодТ–06 ПО ИЗУЧЕНИЮ МОДЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ НА КОМПЬЮТЕРЕ

## *Законы идеального газа*

*Цель работы:* изучение закономерностей поведения идеального газа при изотропных и политропных процессах. Определение количества газа, а также его работы и молярных теплоемкостей при изотропных и политропных процессах.

### 1. Теоретическое содержание

*Газ* называют *идеальным*, когда энергия потенциального взаимодействия его частиц (атомов, молекул) пренебрежимо мала по сравнению с их средней кинетической энергией. Изменение кинетической энергии частиц газа происходит только при упругих соударениях друг с другом. Объем частиц газа пренебрежимо мал по сравнению с объемом, занимаемым газом, так что частицы газа можно считать материальными точками, свободно перемещающимися внутри занимаемого газом объема.

Идеальный газ является простейшим примером *термодинамической системы* – макроскопической системы определенным образом взаимодействующих частиц. Состояние термодинамической системы как целого называют *макросостоянием*. Макросостояние термодинамической системы однозначно описывается конечным числом макроскопических параметров, которые носят название термодинамических. Количество термодинамических параметров много меньше количества частиц, образующих термодинамическую систему. Так состояние (макросостояние) идеального газа описывается следующими термодинамическими параметрами: температурой, давлением, объемом, массой газа.

Макросостояние идеального газа (термодинамической системы) называют *равновесным*, если значения его термодинамических параметров не изменяются ни во времени, ни в пространстве, занимаемом газом. В равновесном состоянии термодинамическая система может оставаться сколь угодно долго. Всякая термодинамическая система, предоставленная сама себе (не подвергающаяся никаким внешним воздействиям), с течением времени переходит из неравновесного состояния в равновесное.

## 1.1. Уравнение состояния идеального газа

Состояние (макросостояние) идеального газа описывается следующими макроскопическими параметрами: температура  $T$ , давление  $p$ , объем  $V$  и масса  $m$  газа. Эти параметры не являются независимыми. Уравнение, связывающее между собой параметры термодинамической системы, описывающие ее равновесное состояние, называется **уравнением состояния**.

Связь между термодинамическими параметрами идеального газа, находящегося в равновесном состоянии, была впервые сформулирована французским ученым Б. Клапейроном в 1834 г., а в 1874 г. обоснована с точки зрения молекулярно-кинетической теории русским химиком Д.И. Менделеевым. Поэтому уравнение состояния идеального газа

$$pV = \frac{m}{\mu}RT \text{ или } pV = \nu RT$$

обычно называют уравнением Менделеева–Клапейрона. Универсальная газовая постоянная  $R = 8,314462$  Дж/(К·моль) одинакова для всех газов. Из уравнения Менделеева–Клапейрона видно, что состояние идеального газа зависит от количества газа  $\nu = \frac{m}{\mu}$ , где  $m$  – масса,  $\mu$  – молярная масса газа.

## 1.2. Первое начало термодинамики

Первое начало термодинамики является частным случаем закона сохранения и превращения энергии.

Согласно **первому началу термодинамики** состояние термодинамической системы (идеального газа) можно изменить, либо сообщив газу некоторое количество теплоты  $dQ$ , либо совершив над газом работу за счет внешних сил  $dA_{\text{вн}}$ :

$$dQ = (dU + dA) + dA_{\text{вн}}.$$

Изменение внутренней энергии системы  $dU$  и работа  $dA$ , совершаемая газом, являются функциями состояния системы. Согласно молекулярно-кинетической теории внутренняя энергия идеального газа определяется его температурой

$$U = \frac{i}{2} \nu RT$$

и зависит от количества степеней свободы  $i$  образующих газ частиц (атомов, молекул).

Если на термодинамическую систему внешние силы не действуют, она считается **замкнутой** (работа внешних сил равна нулю  $dA_{\text{вн}} = 0$ ). Согласно первому началу термодинамики, изменение состояния замкнутой термодинамической системы происходит только за счет сооб-

щенной газу теплоты  $dQ$ , которая расходуется или на изменение его внутренней энергии  $dU$ , или на совершение газом работы  $dA$ :

$$dQ = dU + dA.$$

В *незамкнутой* термодинамической системе изменение состояния газа может происходить и без подведения к нему теплоты ( $dQ = 0$ ). Тогда изменение состояния газа (изменение внутренней энергии  $dU$  или работа  $dA$ , совершаемая газом) происходит за счет работы внешних сил:

$$-dA_{\text{вн}} = dU + dA.$$

Термодинамическая система не может самопроизвольно перейти из одного равновесного состояния в другое. Для этого систему (газ) необходимо подвергнуть внешнему воздействию. Внешнее воздействие (количество теплоты, работа внешних сил) выводит термодинамическую систему из состояния равновесия. Если в дальнейшем система не подвергается внешним воздействиям, с течением времени она переходит из неравновесного состояния в равновесное, отличное от первоначального.

### 1.3. Изотропные и политропные процессы

Переход термодинамической системы (идеального газа) из одного макросостояния в другое называется термодинамическим процессом. Переход термодинамической системы из неравновесного состояния в равновесное называется неравновесным термодинамическим процессом. Так как непосредственный переход из одного равновесного состояния в другое (минуя неравновесное состояние) невозможен, под *равновесным термодинамическим процессом* понимают последовательность равновесных состояний термодинамической системы, которая может быть получена в результате однотипного внешнего воздействия разной интенсивности. Если при любом последовательном увеличении и уменьшении интенсивности внешнего воздействия термодинамическая система проходит через одно и то же непрерывное множество равновесных состояний, то такой равновесный процесс называется обратимым. При этом закономерность протекания такого равновесного процесса не зависит от характера внешнего воздействия (количество теплоты, работа внешних сил), с помощью которого получена соответствующая последовательность равновесных состояний. Поэтому закономерности протекания равновесных термодинамических процессов рассматриваются независимо от характера внешнего воздействия на систему.

Под уравнением равновесного термодинамического процесса понимают закон изменения одного или нескольких термодинамических параметров, характеризующих данную совокупность равновесных состояний. Термодинамические параметры идеального газа ( $p$ ,  $V$ ,  $T$ ,  $m$ ) связаны между собой уравнением Менделеева–Клаперона. Поэтому

чтобы задать уравнение равновесного термодинамического процесса идеального газа достаточно задать закон изменения одного или двух параметров. Тогда закон изменения остальных параметров можно получить из уравнения Менделеева–Клапейрона.

Равновесный термодинамический процесс, в котором один из параметров состояния системы остается постоянным, называется **изотропным** или **изопроцессом**.

Если при переходе термодинамической системы из одного равновесного состояния в другое температура остается постоянной, процесс называется **изотермическим** и описывается уравнением:  $T = const$  ( $dT = 0$ ).

Из уравнения Менделеева–Клапейрона следует, что изотермический процесс для идеального газа постоянной массы (количества газа,  $dv = 0$ ) также описывается уравнением

$$pV = \nu RT = const \text{ или } p = \frac{\nu RT}{V} \text{ (при } T = const, \nu = const)$$

$$\text{(в дифференциальной форме: } dp = -\frac{\nu RT}{V^2} dV),$$

которое называется **законом Бойля–Мариотта**. Закон Бойля–Мариотта был открыт экспериментально в 1662–1676 гг. Согласно закону Бойля–Мариотта при изотермическом процессе давление идеального газа постоянной массы обратно пропорционально его объему (увеличение объема газа приводит к уменьшению его давления).

Если при переходе термодинамической системы из одного равновесного состояния в другое объем остается постоянным, процесс называется **изохорным** и описывается уравнением:  $V = const$  ( $dV = 0$ ). Из уравнения Менделеева–Клапейрона следует, что изохорный процесс для идеального газа постоянной массы (количества газа,  $dv = 0$ ) также описывается уравнением

$$\frac{p}{T} = \frac{\nu R}{V} = const \text{ или } p = \frac{\nu R}{V} T \text{ (при } V = const, \nu = const) \Rightarrow$$

$$dp = \frac{\nu R}{V} dT,$$

которое называется **законом Шарля**. Закон Шарля был открыт экспериментально в 1787 г. Согласно закону Шарля при изохорном процессе давление идеального газа постоянной массы прямо пропорционально его температуре (увеличение температуры газа приводит к увеличению его давления).

Если при переходе термодинамической системы из одного равновесного состояния в другое давление остается постоянным, процесс называется **изобарным** и описывается уравнением:  $p = const$  ( $dp = 0$ ). Из уравнения Менделеева–Клапейрона следует, что изобарный процесс

для идеального газа постоянной массы (количества газа,  $dv = 0$ ) также описывается уравнением

$$\frac{V}{T} = \frac{\nu R}{p} = \text{const} \text{ или } V = \frac{\nu R}{p} T \text{ (при } p = \text{const}, \nu = \text{const}) \Rightarrow$$

$$dV = \frac{\nu R}{p} dT,$$

которое называется **законом Гей-Люссака**. Закон Гей-Люссака был открыт экспериментально в 1802 г. Согласно закону Гей-Люссака при изобарном процессе объем идеального газа постоянной массы прямо пропорционален его температуре (увеличение температуры газа приводит к увеличению его объема).

Законы Бойля–Мариотта, Шарля и Гей-Люссака в совокупности с законом Дальтона (давление смеси газов равно алгебраической сумме их парциальных давлений) и законом Авогадро (в равных объемах различных газов при одинаковых условиях содержится одинаковое число молекул) образуют фундамент молекулярно-кинетической теории газов и называют **газовыми законами** (законами идеального газа).

Кроме изотропных (изо процессов) существуют процессы, в которых остается постоянным не один из термодинамических параметров, а некоторая функция состояния системы. Например, если при переходе термодинамической системы из одного равновесного состояния в другое остается постоянным произведение  $pV^n$ , процесс называется **политропным** и описывается уравнением:  $pV^n = \text{const}$  или  $d(pV^n) = 0$ . Уравнение политропного процесса для идеального газа постоянной массы (количества газа) с учетом уравнения Менделеева–Клапейрона также можно записать в виде

$$pV^n = \text{const} \text{ или } TV^{n-1} = \text{const} \text{ или } p^{n-1}T^{-n} = \text{const},$$

где  $n$  называют **показателем политропы**. Изотропные процессы можно рассматривать как частные случаи политропного:  $n = 0$  – изобарный процесс  $TV^{-1} = \text{const}$ ;  $n = 1$  – изотермический процесс  $pV = \text{const}$ ;  $n = \pm\infty$  – изохорный процесс. Показатель политропы в различных термодинамических процессах может быть любым вещественным числом, как положительным, так и отрицательным. Однако термодинамические процессы с отрицательным показателем политропы в технике не используются.

#### 1.4. Работа, совершаемая газом при изотропных и политропных процессах

При термодинамических процессах состояние идеального газа изменяется, а значит, изменяется и энергия термодинамической системы.

Мерой изменения энергии является работа. Элементарная работа  $dA$  определяется как скалярное произведение силы  $\vec{F}$  на элементарное перемещение  $d\vec{r}$ , вызванное этой силой

$$dA = (\vec{F} \cdot d\vec{r}) = F \cdot dr \cos \alpha.$$

Газ постоянной массы, находящийся в некотором объеме с площадью поверхности  $S$ , действует на окружающую его поверхность с силой, прямо пропорциональной давлению  $p$  газа ( $F = p \cdot S$ ) и направленной перпендикулярно поверхности. Действие силы может вызвать изменение объема газа на величину  $dV = S \cdot dr$  за счет перемещения границ поверхности на расстояние  $dr$  в направлении действия силы ( $\cos \alpha = 1$ ). Если изменяется хотя бы один термодинамический параметр ( $p$ ,  $V$ ,  $T$  или  $m$ ), состояние газа изменяется (происходит термодинамический процесс). Тогда элементарная работа  $dA$ , совершаемая газом в этом термодинамическом процессе

$dA = F \cdot dr = p \cdot (S \cdot dr) \Rightarrow dA = p dV$  равна произведению давления газа  $p$  на элементарное изменение его объема  $dV$ .

Работа газа постоянной массы при переходе из состояния 1 (с параметрами  $p_1, V_1, T_1$ ) в состояние 2 (с параметрами  $p_2, V_2, T_2$ ) в результате некоторого термодинамического процесса равна

$$A = \int_1^2 p dV.$$

Если в некотором термодинамическом процессе работа положительна, то говорят, что газ совершает работу. Если работа отрицательна, то говорят, что над газом совершают работу.

Зависимость давления газа от его объема  $p = p(V)$  при разных термодинамических процессах носит различный характер. При графическом изображении зависимости  $p = p(V)$  работа газа равна площади под кривой (рис. 1) между точками 1 и 2. Рассмотрим работу газа при изотропных и политропных процессах. Идеальный газ одновременно подчиняется уравнению Менделеева–Клапейрона (уравнению состоя-

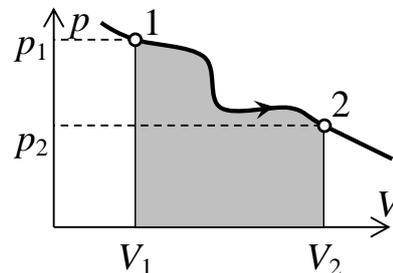


Рис. 1

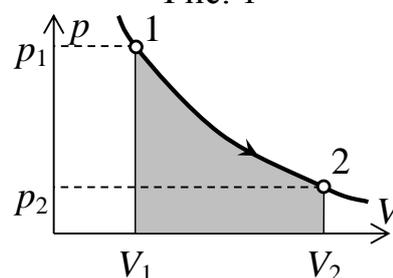


Рис. 2

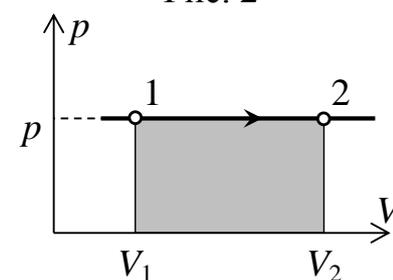


Рис. 3

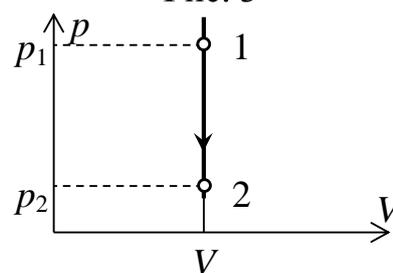


Рис. 4

ния) и уравнению термодинамического процесса, в котором он участвует.

**Изотермический процесс** (рис. 2) описывается уравнением  $T = const$ . Из уравнения Менделеева–Клапейрона можно выразить давление  $p = \frac{\nu RT}{V}$ . Тогда работа газа при переходе из состояния 1 ( $p_1, V_1, T$ ) в состояние 2 ( $p_2, V_2, T$ ) равна

$$A = \int_1^2 p dV = \nu RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \nu RT \ln V \Big|_{V_1}^{V_2} \Rightarrow A = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

**При изобарном процессе** (рис. 3) давление газа остается постоянным  $p = const$  (уравнение термодинамического процесса). Тогда работа газа при переходе из состояния 1 ( $p, V_1, T_1$ ) в состояние 2 ( $p, V_2, T_2$ ) равна

$$A = \int_1^2 p dV = p \int_{V_1}^{V_2} dV = pV \Big|_{V_1}^{V_2} = p(V_2 - V_1).$$

**При изохорном процессе** (рис. 4) объем газа остается постоянным  $V = const, dV = 0$  (уравнение термодинамического процесса). Тогда работа газа при переходе из состояния 1 ( $p_1, V, T_1$ ) в состояние 2 ( $p_2, V, T_2$ ) равна нулю

$$A = \int_1^2 p dV = 0.$$

**При политропном процессе** остается постоянным произведение  $pV^n = const, d(pV^n) = 0$  (уравнение термодинамического процесса). Запишем  $d(pV^n)$  в виде:

$$\begin{aligned} d(pV^n) &= d(pV \cdot V^{n-1}) = V^{n-1} \cdot d(pV) + pV \cdot d(V^{n-1}) \Rightarrow \\ d(pV^n) &= V^{n-1} d(pV) + pV \cdot (n-1)V^{n-2} dV = \\ &= V^{n-1} [d(pV) + (n-1)p dV]. \end{aligned}$$

Тогда из уравнения процесса получим:

$$d(pV^n) = 0 \Rightarrow d(pV) = (1-n) p dV.$$

Продифференцировав уравнение Менделеева–Клапейрона, для газа постоянной массы получим:

$$d(pV) = \nu R dT.$$

Сравнивая полученные выражения для полного дифференциала  $d(pV)$  из уравнения состояния идеального газа и из уравнения политропного процесса, можно записать, что  $p dV = \frac{\nu R}{1-n} dT$ . Тогда работа газа при переходе из состояния 1 ( $p_1, V_1, T_1$ ) в состояние 2 ( $p_2, V_2, T_2$ ) равна

$$A = \int_1^2 p dV = \frac{\nu R}{1-n} \int_{T_1}^{T_2} dT = \frac{\nu R}{1-n} T \Big|_{T_1}^{T_2} = \frac{\nu R}{1-n} (T_2 - T_1).$$

## 1.5. Теплоемкость газа при изотропных и политропных процессах

Рассмотрим равновесный термодинамический процесс (переход идеального газа из одного равновесного состояния в другое), который происходит за счет получения системой теплоты из окружающей среды. **Теплоемкость газа** – физическая величина, численно равная отношению количества теплоты  $dQ$ , переданной газу при некотором термодинамическом процессе, к изменению температуры  $dT$  газа в результате данного процесса.

Теплоемкость зависит от количества газа. Теплоемкость одного моля газа  $C = \frac{dQ}{\nu dT}$  называется **молярной** и измеряется в Дж/(моль·К). Теплоемкость единицы массы газа  $c = \frac{dQ}{m dT}$  называется **удельной** и измеряется в Дж/(кг·К).

Из первого начала термодинамики  $dQ = dU + dA$  для замкнутой термодинамической системы следует, что молярная теплоемкость идеального газа в некотором термодинамическом процессе равна

$$C = \frac{dQ}{\nu dT} = \frac{1}{\nu} \frac{dU}{dT} + \frac{1}{\nu} \frac{dA}{dT}.$$

Изменение внутренней энергии  $dU$  газа происходит только за счет изменения его температуры:  $dU = \frac{i}{2} R dT$ . Поэтому

$$C = \frac{i}{2} R + \frac{1}{\nu} \frac{dA}{dT}.$$

В различных термодинамических процессах газ совершает разную работу  $dA$ , и обладает различной теплоемкостью  $C$ .

**При изохорном процессе** ( $V = const$ ) работа не совершается ( $dA = 0$ ) – сообщенная газу теплота расходуется только на изменение внутренней энергии газа:  $dQ = dU$ . Молярная теплоемкость идеального газа при изохорном процессе  $C_V$  постоянна (не зависит от температуры газа), равна

$$C_V = \frac{i}{2} R = const$$

и называется **молярной теплоемкостью при постоянном объеме**.

Тогда внутреннюю энергию идеального газа можно выразить через молярную теплоемкость при постоянном объеме  $C_V$  и записать в

виде:  $U = \nu \frac{i}{2} RT = \nu C_V T$  или  $dU = \nu C_V dT$ . А молярную теплоемкость газа при произвольном термодинамическом процессе:

$$C = \frac{dQ}{\nu dT} = C_V + \frac{1}{\nu} \frac{dA}{dT}.$$

**При изобарном процессе** ( $p = const$ ) элементарная работа газа равна  $dA = p dV$ , а из уравнения Менделеева–Клапейрона  $pV = \nu RT$  легко получить, что  $p dV = \nu R dT$ . Тогда молярная теплоемкость идеального газа при изобарном процессе также постоянна:

$$C_P = C_V + \frac{1}{\nu} \frac{dA}{dT} = C_V + \frac{1}{\nu} \frac{p dV}{dT} = C_V + R = const$$

и называется **молярной теплоемкостью при постоянном давлении**.

Хотя значения  $C_V$  и  $C_P$  для разных газов различны, разность молярных теплоемкостей при постоянном давлении и при постоянном объеме одинакова для всех идеальных газов и равна универсальной газовой постоянной

$$C_P - C_V = R.$$

Это уравнение называется **уравнением Майера**, оно было впервые получено Р. Майером в 1842 г.

Удельная теплоемкость при постоянном давлении для различных газов является одной из основных физических характеристик газов, определяется экспериментально и приводится в физических справочниках.

**При изотермическом процессе** ( $T = const$ ) температура газа не изменяется ( $dT = 0$ ). Поэтому теплоемкость идеального газа при изотермическом процессе считается бесконечной:

$$C_T = \left. \frac{dQ}{\nu dT} \right|_{dT \rightarrow 0} = \infty.$$

Таким образом, молярные теплоемкости идеальных газов при всех изотропных процессах постоянны ( $C_V = const$ ,  $C_P = const$ ) – не зависят от температуры газа.

**При политропном процессе** ( $pV^n = const$ ) элементарная работа газа равна  $dA = p dV = \frac{\nu R}{1-n} dT$ . Тогда молярная теплоемкость идеального газа при политропном процессе:

$$C = C_V + \frac{1}{\nu} \frac{dA}{dT} = C_V + \frac{R}{1-n} = \frac{C_P - n C_V}{1-n} = const.$$

Молярная теплоемкость идеального газа при политропном процессе постоянна. Термодинамический процесс называется **политропным**, когда он происходит **при постоянной теплоемкости**. Следовательно, если при некотором термодинамическом процессе теплоемкость идеального газа изменяется (зависит от его температуры), то такой процесс нельзя считать политропным.

## 2. Рабочие формулы

### 2.1. Вычисление работы газа при термодинамическом процессе, сопровождающемся малым изменением давления

Когда аналитический вид уравнения изучаемого термодинамического процесса (явный вид зависимости  $p(V)$ ) неизвестен, работу газа при переходе из состояния 1 ( $p_1, V_1, T_1$ ) в состояние 2 ( $p_2, V_2, T_2$ ), сопровождающемся малым изменением давления газа, можно приближенно рассчитать, опираясь на определение работы:  $A = \int_1^2 p dV$ . Если при изменении объема от  $V_1$  до  $V_2$  изменение давления происходит медленно, монотонно и на малую величину, то на интервале  $[V_1, V_2]$  давление можно приближенно считать постоянным  $p \approx const$  и равным среднему давлению  $\bar{p} = \frac{1}{2}(p_1 + p_2)$  на этом интервале. Тогда

$$A = \int_1^2 p dV \approx \bar{p} \int_{V_1}^{V_2} dV = \bar{p}(V_2 - V_1) = \frac{1}{2}(p_1 + p_2)(V_2 - V_1).$$

### 2.2. Связь между разностью уровней жидкости в трубке и термодинамическими параметрами идеального газа

Рассмотрим изогнутую трубку постоянного сечения  $S$  с одним открытым в атмосферу концом, расположенную в вертикальной плоскости и заполненную в месте ее изгиба идеальной (невязкой, теплопроводящей) несжимаемой жидкостью с плотностью  $\rho$ . Изгиб трубки может иметь как закругленную, так и прямоугольную форму (рис. 5). В закрытом конце трубки, который может заканчиваться резервуаром, находится изучаемый идеальный газ.

По разности уровней жидкости в вертикальных отрезках трубки можно определить давление и объем изучаемого газа. Для случая, когда жидкость в трубке неподвижна, справедливо уравнение Бернулли, утверждающее, что для стационарного (установившегося, не меняющегося со временем) ламинарного течения идеальной несжимаемой жидкости в поле силы тяжести полное давление жидкости в различных сечениях трубки одинаково (сохраняется):

$$p + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2} = const,$$

где  $p$  – статическое давление,  $\rho gh$  – гидравлическое (весовое) давление жидкости на высоте  $h$ ,  $\rho v^2/2$  – динамическое давление жидкости, движущейся со скоростью  $v$ . Если поперечное сечение  $S$  трубки везде одинаково, то из уравнения неразрывности  $Sv = const$  следует, что при

любом движении (ускоренном, равномерном) скорость движения жидкости в разных частях трубки всегда одинакова:

$$\frac{\rho v^2}{2} = \text{const} \Rightarrow p + \rho gh = \text{const}.$$

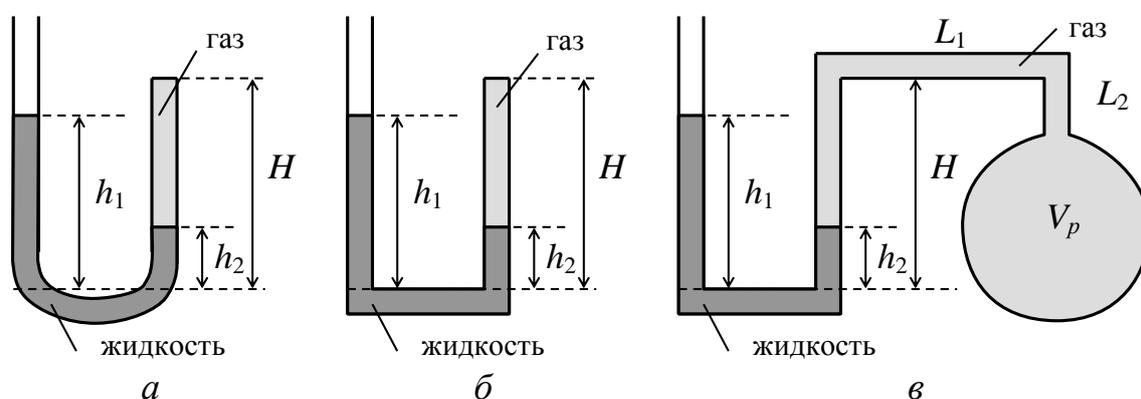


Рис. 5

Равновесному состоянию газа соответствует стационарное (неподвижное) состояние жидкости в трубке. Когда жидкость в трубке неподвижна ( $v = 0$ ), полное давление на высоте  $h_1$  в открытом вертикальном отрезке трубки (граница между жидкостью и атмосферой) должно быть равно полному давлению на высоте  $h_2$  в закрытом вертикальном отрезке трубки (граница между изучаемым идеальным газом и жидкостью):

$$p_0 + \rho gh_1 = p + \rho gh_2,$$

где  $p_0$  – атмосферное давление,  $p$  – давление идеального газа в закрытом отрезке трубки (резервуаре). Тогда

$$p = p_0 + \rho g(h_1 - h_2).$$

Таким образом, измерив для стационарного состояния жидкости разность ее уровней в двух вертикальных отрезках трубки, можно определить давление идеального газа, находящегося в равновесном состоянии.

Объем, занимаемый при этом идеальным газом, можно определить исходя из геометрических размеров трубки и резервуара. Если трубка состоит из прямолинейных, перпендикулярных друг другу отрезков одинакового сечения  $S$ , объем, занимаемый идеальным газом, определить проще (рис. 5в). Для этого достаточно знать объем резервуара  $V_p$ , длину  $H$  вертикального отрезка трубки, содержащего границу между жидкостью и идеальным газом, а также длину соединительных трубок  $L_1$  и  $L_2$ . Тогда объем, занимаемый идеальным газом, равен

$$V = V_p + S(L_1 + L_2 + H - h_2),$$

где  $h_2$  – высота столба жидкости в вертикальном закрытом отрезке трубки (граница между идеальным газом и жидкостью).

Следует отметить, что в сосуде подобной конструкции давление и объем идеального газа зависят от количества жидкости в трубке. При увеличении количества жидкости газ сжимается так, чтобы уравновесить вес жидкости в трубке – объем газа уменьшается, давление увеличивается, а температура остается постоянной. Аналогичный прибор (рис. 5а) позволил Р. Бойлю в 1662 г. экспериментально установить закон изотермического сжатия воздуха.

### 2.3. Работа внешних сил при изотермическом процессе

При добавлении жидкости в трубку (рис. б) термодинамическая система является незамкнутой, а термодинамический (изотермический) процесс происходит без изменения температуры газа ( $\Delta T = 0$ ) и без передачи ему теплоты ( $Q = 0$ ). То есть изотермическое сжатие газа при добавлении жидкости в трубку происходит только за счет совершения работы. При добавлении жидкости в трубку объем, занимаемый в ней газом, уменьшается от  $V_1$  до  $V_2$ , а температура  $T$  остается постоянной. Работа идеального газа в этом случае отрицательна:  $A = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} < 0$ , так как  $V_2 < V_1$ . Следовательно, термодинамический процесс происходит за счет работы  $A_{\text{вн}}$ , совершаемой внешними силами над газом. В соответствии с первым началом термодинамики

$$Q = U + A + A_{\text{вн}} \text{ или } Q = \nu C_V \Delta T + A + A_{\text{вн}} = 0 \Rightarrow A + A_{\text{вн}} = 0.$$

Считая жидкость в трубке идеальной и несжимаемой, рассмотрим действующие на нее силы.

Давление – модуль силы, приходящей на единицу площади. Модуль силы, создаваемой этим давлением, равен  $|F| = pS$ .

На газ, находящийся в трубке, действует сила  $\vec{F}_{\text{жс}}$  со стороны жидкости:  $|F_{\text{жс}}| = p_{\text{жс}}S$ , а на жидкость – сила  $\vec{F}_2$  со стороны газа:  $|F_2| = p_2S$ . Силы  $\vec{F}_{\text{жс}}$  и  $\vec{F}_2$  направлены в противоположные стороны. Если силы  $\vec{F}_{\text{жс}}$  и  $\vec{F}_2$  полностью уравновешивают друг друга, жидкость покоится, а газ находится в равновесном состоянии. Если жидкость движется, значит, силы  $\vec{F}_{\text{жс}}$  и  $\vec{F}_2$  уравновешивают друг друга частично, а газ находится в неравновесном состоянии. Работа силы  $\vec{F}_2$  – это работа газа  $A$ . Сила  $\vec{F}_{\text{жс}}$  по отношению к газу является внешней.

Рассчитаем работу силы  $\vec{F}_{\text{жс}}$  после добавления жидкости в трубку. Пусть некоторому стационарному (неподвижному) состоянию жидкости в трубке (рис. 6а) соответствовало положение уровней жидкости  $h'_1$  и  $h'_2$ , а также давление жидкости  $p' = p_0 + \rho g(h'_1 - h'_2)$ . Силы  $\vec{F}_{\text{жс}}$  и  $\vec{F}_2$

равны по модулю:  $|F_{жс}| = S(p_0 + \rho g(h'_1 - h'_2)) = |F_2|$ , жидкость не движется.

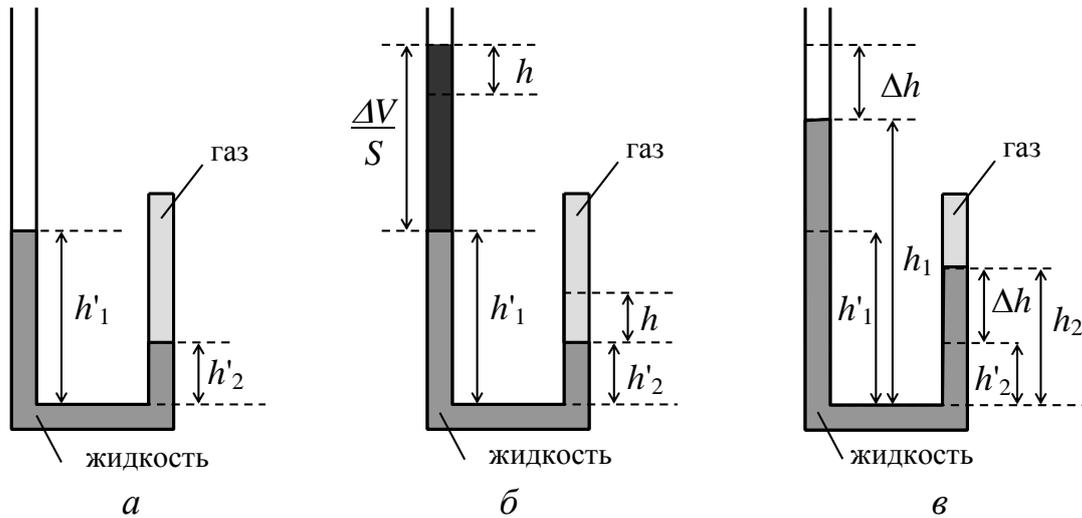


Рис. 6

Будем считать, что добавление всего объема  $\Delta V$  жидкости через открытый конец трубки происходит мгновенно, но без сообщения системе дополнительного импульса со стороны добавленной жидкости. (Эта ситуация легко реализуется, например, если в нижней части трубки установлен вентиль для блокировки движение жидкости, который перед добавлением жидкости закрывают, доливают жидкость, а затем открывают вентиль.) После добавления жидкости объемом  $\Delta V$  уровень жидкости в открытом вертикальном отрезке трубки станет равен  $(h'_1 + \Delta V/S)$ , а в закрытом – по-прежнему останется равным  $h'_2$  (рис. 6б). Модуль силы  $|F_{жс}| = S(p_0 + \rho g(h'_1 + \Delta V/S - h'_2))$  станет больше модуля силы  $|F_2|$  – давление, создаваемое разностью высот жидкости в трубке, станет больше давления газа. Жидкость начнет двигаться (когда вентиль открывают).

Спустя какое-то время уровни жидкости в трубке сместятся на расстояние  $h$ : высота столба жидкости в открытом вертикальном отрезке трубки будет равна  $(h'_1 + \Delta V/S - h)$ , а в закрытом  $(h'_2 + h)$ . Тогда модуль силы, действующей на газ со стороны жидкости в произвольный момент времени, можно записать как

$$|F_{жс}| = S(p_0 + \rho g(h'_1 + \Delta V/S - h - h'_2 - h)) = S(p' + \rho g(\Delta V/S - 2h)).$$

При элементарном перемещении  $dh$  жидкости в направлении действия силы  $\vec{F}_{жс}$  она совершает элементарную работу

$$dA_{жс} = |F_{жс}| \cdot dh = S(p' + \rho g(\Delta V/S - 2h))dh.$$

Если после установления нового стационарного состояния положение уровней несжимаемой жидкости в трубке равны  $h_1$  и  $h_2$  (рис. 6в),

то при переходе из одного стационарного состояния в другое жидкость переместилась на расстояние  $\Delta h = (h_2 - h'_2) = (h'_1 + \Delta V/S - h_1)$ . Тогда работа, совершенная силой  $\vec{F}_{жс}$ , равна

$$A_{жс} = \int_0^{\Delta h} dA_{жс} = \int_0^{\Delta h} (Sp' + \rho g(\Delta V - 2Sh))dh =$$

$$= (Sp'h + \rho g(\Delta Vh - Sh^2)) \Big|_0^{\Delta h}$$

$$A_{жс} = Sp'\Delta h + \rho g(\Delta V\Delta h - S\Delta h^2),$$

где  $\Delta h = (h_2 - h'_2)$  – изменение уровня жидкости в вертикальном отрезке трубки, содержащем границу между жидкостью и изучаемым идеальным газом.

Если в процессе движения жидкость последовательно проходит через ряд состояний, отличающихся от начального ( $h = 0$ ), например, на  $\Delta h'$  и  $\Delta h$ , то можно показать, что

$$A_{жс} = \int dA_{жс} =$$

$$= \int_0^{\Delta h'} (Sp' + \rho g(\Delta V - 2Sh))dh + \int_{\Delta h'}^{\Delta h} (Sp' + \rho g(\Delta V - 2Sh))dh =$$

$$= (Sp' + \rho g(\Delta V - S\Delta h)) \Delta h - (Sp' + \rho g(\Delta V - S\Delta h')) \Delta h' +$$

$$+ (Sp' + \rho g(\Delta V - S\Delta h')) \Delta h' - 0 = (Sp' + \rho g(\Delta V - S\Delta h)) \Delta h$$

работа силы, создаваемой за счет давления жидкости, зависит только расстояния  $\Delta h$  между начальным и конечным положениями уровней жидкости в трубке, и не зависит от положения промежуточных состояний, через которые проходит жидкость. То есть сила, действующая со стороны жидкости, является потенциальной – ее работа не зависит от формы и длины пути, пройденного жидкостью в трубке.

До добавления жидкости в трубку термодинамическая система находилась в равновесном состоянии ( $h'_1$  и  $h'_2$ ). Мгновенное добавление жидкости в трубку выводит систему из равновесия. Предоставленная сама себе (отсутствуют другие воздействия) система с течением времени переходит в новое равновесное состояние ( $h_1$  и  $h_2$ ). Переход из неравновесного состояния в равновесное сопровождается колебаниями жидкости в трубке. Колебания происходят относительно положения равновесия центра инерции системы жидкость–газ. После достижения равновесного состояния центр инерции системы будет находиться в положении равновесия (силы, действующие на систему, скомпенсированы). Любое смещение центра инерции из положения равновесия приво-

дит к появлению отличной от нуля результирующей силы, стремящейся вернуть систему жидкость–газ в положение равновесия.

Центр инерции системы движется под действием результирующей силы  $\vec{F} = \vec{F}_{жс} - \vec{F}_2$ , проекция которой на направление силы  $\vec{F}_{жс}$  равна  $F = F_{жс} - F_2$ . В момент добавления жидкости в трубку (в начальный момент) проекция этой силы равна

$$F(0) = F_{жс} - F_2 = S(p_0 + \rho g(h'_1 + \Delta V/S - h'_2)) - S(p_0 + \rho g(h'_1 - h'_2)) = \rho g \Delta V.$$

Этому моменту времени соответствует смещение центра инерции системы из положения равновесия на  $\Delta h = (h_2 - h'_2)$  в сторону, противоположную направлению результирующей силы  $\vec{F}$ . Тогда проекцию результирующей силы  $F(0)$  в момент добавления жидкости в трубку можно выразить через отклонение центра инерции от положения равновесия  $x(0) = -\Delta h$  следующим образом:

$$F(0) = \rho g \Delta V = -\rho g \frac{\Delta V}{\Delta h} (-\Delta h) = -\rho g \frac{\Delta V}{\Delta h} x(0).$$

В процессе движения жидкости по трубке газ сжимается, следовательно, давление газа увеличивается, а давление жидкости одновременно уменьшается (так как уменьшается разность уровней жидкости в вертикальных отрезках трубки). Модуль результирующей силы постепенно уменьшается от  $|F(0)|$  в начальный момент времени до нуля в положении равновесия системы. Следовательно, модуль результирующей силы  $|F|$ , действующей на систему, и модуль смещения  $|x|$  центра инерции системы относительно положения равновесия уменьшаются прямо пропорционально друг другу, но  $\vec{F}$  и  $\vec{x}$  направлены в противоположные стороны. Поэтому проекцию результирующей силы, действующей на систему в произвольный момент времени, можно записать в виде:

$$F = -\rho g \frac{\Delta V}{\Delta h} x.$$

Таким образом, движение системы жидкость–газ в трубке происходит под действием силы, аналогичной силе упругости Гука ( $F_{упр} = -kx$ , где  $x$  – смещение из положения равновесия). Под действием этой силы жидкость в трубке должна совершать бесконечные колебания. Чтобы со временем колебания жидкости прекратились, а термодинамическая система перешла из неравновесного состояния в равновесное, в системе должно присутствовать трение.

Квазиупругая результирующая сила  $\vec{F}$  (по аналогии с силой Гука) является консервативной. Ее работа не зависит от пути, пройденного жидкостью, а определяется только начальным  $x_1$  и конечным  $x_2$  смеще-

нием центра инерции системы относительно положения равновесия и равна изменению соответствующей потенциальной энергии:

$$A_F = \int_{x_1}^{x_2} F dx = -\rho g \frac{\Delta V}{\Delta h} \int_{x_1}^{x_2} x dx = \rho g \frac{\Delta V}{\Delta h} \frac{x_1^2}{2} - \rho g \frac{\Delta V}{\Delta h} \frac{x_2^2}{2} = -\Delta E.$$

Сила трения является неконсервативной. Ее работу можно найти из закона сохранения и изменения полной механической энергии, согласно которому работа неконсервативных сил, действующих в системе, равна изменению полной механической энергии системы.

Рассмотрим переход системы жидкость–газ из одного стационарного состояния в другое. Кинетическая энергия жидкости в начальный и конечный момент времени равна нулю (жидкость и газ неподвижны). Следовательно, работа силы трения  $A_{mp}$  равна разности потенциальных энергий  $\Delta E$  квазиупругих колебаний под действием силы  $\vec{F}$ . Начальное смещение центра инерции системы из положения равновесия равно  $x_1 = -\Delta h$ , конечное  $x_2 = 0$ . Тогда работа силы трения равна

$$A_{mp} = \Delta E = \rho g \frac{\Delta V}{\Delta h} \frac{x_2^2}{2} - \rho g \frac{\Delta V}{\Delta h} \frac{x_1^2}{2} = -\rho g \frac{\Delta V}{\Delta h} \frac{\Delta h^2}{2} = -\rho g \frac{\Delta V}{2} \Delta h,$$

$$A_{mp} = -\rho g \frac{\Delta V}{2} \Delta h.$$

Сила трения направлена в сторону, противоположную перемещению жидкости, поэтому ее работа всегда отрицательна. Так как жидкость в трубке является идеальной (невязкой, теплопроводящей), трение жидкости о трубку не приводит к изменению температуры жидкости. Если трубка также является теплопроводящей, то изменение температуры газа при добавлении жидкости в трубку не происходит – процесс сжатия газа является изотермическим.

Таким образом, по отношению к газу внешними являются сила трения и сила, возникающая за счет давления жидкости на газ. Работа внешних сил равна

$$A_{\text{вн}} = A_{\text{жс}} + A_{mp},$$

$$A_{\text{вн}} = Sp' \Delta h + \rho g (\Delta V \Delta h - S \Delta h^2) - \rho g \Delta V \Delta h / 2 =$$

$$= Sp' \Delta h + \rho g (\Delta V \Delta h / 2 - S \Delta h^2),$$

$$A_{\text{вн}} = (Sp' + \rho g (\Delta V / 2 - S \Delta h)) \Delta h.$$

Работа внешних сил положительна.

Следует отметить, что по сравнению с работой силы, возникающей за счет давления жидкости, работа силы трения пренебрежимо мала. Однако наличие трения позволяет термодинамической системе совершить переход из неравновесного состояния в равновесное.

Согласно первому началу термодинамики  $A + A_{\text{вн}} = 0$  при изотермическом сжатии газа без сообщения системе теплоты работа внеш-

них сил  $A_{\text{вн}} = (Sp' + \rho g(\Delta V/2 - S\Delta h))\Delta h$  и работа газа  $A = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}$  должны быть равны по модулю и противоположны по знаку. В этом можно убедиться, рассчитав на основе экспериментальных данных работу газа и работу внешних сил. Для этого достаточно измерить высоту уровней несжимаемой жидкости в трубке в двух стационарных состояниях: до ( $h'_1$  и  $h'_2$ ) и после ( $h_1$  и  $h_2$ ) добавления жидкости.

## 2.4. Определение молярной теплоемкости газа

Если в некотором равновесном термодинамическом процессе система (идеальный газ) получает некоторое количество теплоты  $Q$ , а температура газа изменяется при этом от  $T$  до  $T_K$ , то, опираясь на определение, можно рассчитать молярную теплоемкость газа

$$C = \frac{Q}{\nu \Delta T} \text{ или } C = \frac{Q}{\nu(T_K - T)}.$$

Если изучаемый термодинамический процесс имеет постоянную теплоемкость, то данная формула является точной и позволяет рассчитать молярную теплоемкость при любом изменении температуры  $\Delta T = T_K - T$  и количестве теплоты  $Q$ . Если рассматриваемый термодинамический процесс происходит с переменной теплоемкостью, то данную формулу можно считать приближенной (справедливой только для малого изменения температуры  $\Delta T$  газа и получаемого им количества теплоты  $Q$ ).

На основе этой формулы, зная количество теплоты  $Q$ , полученное газом, можно определить молярную теплоемкость газа  $C$  при различных термодинамических процессах. Если теплоемкость окажется постоянной (одинаковой в разных диапазонах температур), данный процесс можно считать политропным. Если в изучаемом политропном процессе не изменяется только объем газа, то процесс является изохорным, а рассчитанная теплоемкость – молярной теплоемкостью газа при постоянном объеме  $C = C_V$ . Если в изучаемом политропном процессе не изменяется только давление газа, то процесс является изобарным, а рассчитанная теплоемкость – молярной теплоемкостью газа при постоянном объеме  $C = C_P$ .

Учитывая связь внутренней энергии газа с молярной теплоемкостью газа при постоянном объеме  $U = \nu C_V T$ , следует отметить, что при любом термодинамическом процессе, проходящем за счет полученной идеальным газом теплоты  $Q$ , можно определить молярную теплоемкость газа при постоянном объеме  $C_V$  из первого начала термодинамики

$$Q = U + A \text{ или } Q = C_V \nu (T_K - T) + A$$

$$\Rightarrow C_V = \frac{Q - A}{\nu(T_K - T)},$$

предварительно рассчитав работу газа  $A$  в данном термодинамическом (не изотермическом) процессе. Используя далее уравнение Майера можно также вычислить молярную теплоемкость газа при постоянном давлении:  $C_p = R + C_v$ .

## 2.5. Уравнение теплового баланса

Сообщить некоторое количество теплоты термодинамической системе (идеальному газу) можно с помощью теплообмена.

Самопроизвольный необратимый процесс переноса теплоты от одного тела к другому, обусловленный разницей их температур, называется **теплообменом**. Теплообмен – переход термодинамической системы из неравновесного состояния в равновесное. Если система тел, участвующих в теплообмене теплоизолирована от внешней среды (например, находится в калориметре), для такой замкнутой системы справедливо уравнение теплового баланса, которое является частным случаем закона сохранения и превращения энергии: количество теплоты **в замкнутой системе** сохраняется (изменение количества теплоты в замкнутой системе равно нулю).

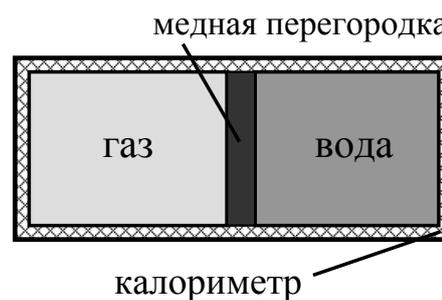


Рис. 7

Пусть в калориметре (рис. 7) находится резервуар с газом, вода массой  $m_B$  и разделяющая их медная теплопроводящая перегородка массой  $m_M$ . В начальный момент времени (до начала теплообмена) температура газа и перегородки равны  $T$ , а температура воды  $T_B > T$ . После окончания теплообмена температура всех тел, находящихся в калориметре, станет одинаковой и равной  $T_K$ . Тогда в результате теплообмена количество теплоты  $Q_B$ , отданное водой, должно быть равно количеству теплоты, полученному газом  $Q$  и медной перегородкой  $Q_M$ .

$$Q_B - Q_M - Q = 0.$$

Из определения удельной теплоемкости меди и воды следует, что  $Q_B = c_B m_B (T_B - T_K)$ ,  $Q_M = c_M m_M (T_K - T)$ , где  $c_B$  и  $c_M$  – удельная теплоемкость воды и меди, соответственно. Тогда из уравнения теплового баланса можно определить количество теплоты, полученное газом в результате теплообмена

$$Q = Q_B - Q_M = c_B m_B (T_B - T_K) - c_M m_M (T_K - T).$$

Если **система**, участвующая в теплообмене, **не замкнута**, то, согласно закону сохранения и изменения энергии, изменение количества теплоты в такой системе равно работе внешних сил.

Рассмотрим резервуар с газом, находящийся в калориметре и соединенный с частично заполненной идеальной несжимаемой жидкостью (например, глицерином) открытой S-образной трубкой (рис. 8), в которую в процессе теплообмена можно подливать жидкость. Выходящая из калориметра трубка достаточно тонкая и теплоизолированная. Поэтому теплообменом с окружающей средой через поверхность трубки, а также теплообменом между газом и глицерином можно пренебречь. Несжимаемая жидкость в трубке (глицерин) играет роль подвижного поршня, не позволяя газу покинуть сосуд. При нагревании газ расширяется, изменяя разность уровней глицерина в трубке.

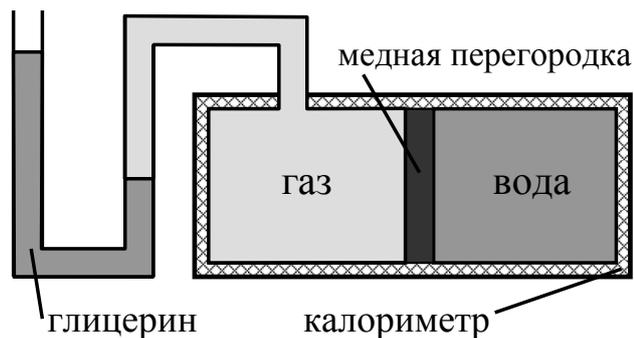


Рис. 8

Если при нагревании газа в калориметре объем глицерина в трубке не изменяется, то термодинамическая система остается замкнутой. Уравнение теплового баланса по-прежнему имеет вид:  $Q_B - Q_M - Q = 0$ .

Если при нагревании газа в калориметре одновременно изменяют объем глицерина (увеличивают или уменьшают), на термодинамическую систему оказывают действие внешние силы (со стороны добавочного объема жидкости). Такая система является незамкнутой. Тогда уравнение теплового баланса для нее примет вид:

$$Q_B - Q_M - Q = A_{вн}.$$

Из этого уравнения можно определить количество теплоты, полученное газом:

$$Q = Q_B - Q_M - A_{вн}.$$

Сложный термодинамический процесс (переход из неравновесного состояния в равновесное) в незамкнутой системе, при котором одновременно происходит и теплообмен с расширением газа, и увеличение количества глицерина в трубке, вызывающее сжатие газа, можно разделить на два последовательных этапа: 1) теплообмен без изменения количества жидкости в трубке; 2) изменение количества жидкости в трубке без теплообмена (изотермический процесс). Учитывая, что при изотермическом процессе работа внешних сил  $A_{вн}$  равна работе газа  $A = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ , взятой с противоположным знаком, уравнение теплового баланса для изучаемого сложного термодинамического процесса в целом можно записать в виде

$$Q = Q_B - Q_M - A.$$

Данная принципиальная схема экспериментальной установки позволяет изучать различные термодинамические процессы. Изотермический процесс осуществляется путем добавления (уменьшения) глицерина в трубку без теплообмена с водой в калориметре. Для осуществления изобарного процесса необходимо в процессе нагревания газа в калориметре поддерживать постоянную разность уровней глицерина в трубке, постепенно отливая жидкость из нее. Для осуществления изохорного процесса необходимо в процессе нагревания газа в калориметре поддерживать постоянный объем, занимаемый газом, доливая глицерин в трубку. Кроме того, можно наблюдать расширение газа при нагревании под подвижным поршнем без изменения количества глицерина в трубке. Этот процесс в отличие от двух предыдущих происходит в замкнутой термодинамической системе и близок к политропному. Поэтому в работе используется модель данной экспериментальной установки.

### **3. Модель экспериментальной установки**

В данной работе с помощью средств компьютерной графики моделируется поведение идеального газа в резервуаре, помещенном в калориметр и соединенном с открытой S-образной теплопроводящей трубкой постоянного сечения, состоящей из прямолинейных перпендикулярных отрезков, расположенной в вертикальной плоскости и частично заполненной глицерином (идеальной несжимаемой жидкостью). Для изменения температуры газа резервуар в калориметре приводят в соприкосновение с нагретой (охлажденной) водой путем установливания между водой и газом теплопроводящей медной перегородки (рис. 8). С помощью данной установки можно изучать следующие термодинамические процессы: изотермический, изобарный, изохорный, политропный. Измерение разности уровней глицерина в трубке позволяет определить давление и объем газа, находящегося в равновесном состоянии. Объем глицерина в трубке можно изменять (увеличивать, уменьшать) порциями от 5 до 500 мл. Температуру воды в калориметре можно изменять от 5 до 95 °С. Для определения установившейся в процессе теплообмена температуры используется встроенный термометр, способный измерять температуру воды с точностью  $10^{-4}$  °С. Для измерения уровня глицерина в трубке используется линейка, позволяющая выполнять измерения с точностью до 0,15 см. При указанных условиях погрешность определения молярных теплоемкостей газа при различных термодинамических процессах не превышает 1–2 %.

Работа выполняется на IBM-совместимом персональном компьютере в виде самостоятельного Windows-приложения. Для удобства выполнения работы в программе предусмотрены три раздела: краткое описание работы; порядок выполнения работы и эксперимент. Переключе-

ние между разделами осуществляется с помощью кнопок «Ход работы» и «Эксперимент». Нажатие этих кнопок в зависимости от контекста работы программы приводит либо к вызову соответствующих разделов, либо к возвращению в раздел описания.

Раздел программы «Эксперимент» содержит раскрывающийся список для выбора газа в резервуаре, счетчики для изменения количества глицерина в сосуде и температуры воды в калориметре, переключатель, позволяющий устанавливать и извлекать теплопроводящую перегородку для управления процессом теплообмена в калориметре, ползунок для измерения уровней глицерина в сосуде, а также вспомогательные кнопки, позволяющие управлять экспериментом.

### Варианты выполнения работы

Вариант	Газ
1	Пропан
4	Ацетон
7	Сероводород
10	Водород
13	Аргон

Вариант	Газ
2	Этан
5	Аммиак
8	Хлор
11	Азот

Вариант	Газ
3	Этилен
6	Метан
9	Кислород
12	Гелий

## 4. Порядок выполнения работы

### 4.1. Краткое описание хода работы

1. Выберите газ, поведение которого будет изучаться в эксперименте (по указанию преподавателя).

2. Измерьте высоту вертикально расположенных отрезков трубки.

#### Изотермическое сжатие газа

3. Добейтесь, чтобы температура изучаемого газа стала равна 20 °С.

4. Отрегулируйте начальный уровень глицерина в трубке.

5. Рассчитайте объем глицерина, который предстоит добавлять в трубку в каждом опыте.

6. Добавьте рассчитанную порцию глицерина и измерьте положения уровней глицерина в трубке.

7. Повторите опыт несколько раз.

8. Рассчитайте объем и давление газа в каждом опыте.

9. Постройте график зависимости давления газа от его объема.

10. Определите количество и массу газа.

11. Рассчитайте работу, совершенную газом.

### **Расширение газа при нагревании**

12. Добейтесь, чтобы температура изучаемого газа стала равна  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
13. Отрегулируйте начальный уровень глицерина в трубке.
14. Нагрейте газ и измерьте положения уровней глицерина в трубке.
15. Повторите опыт несколько раз.
16. Рассчитайте объем и давление газа в каждом опыте.
17. Постройте график зависимости давления газа от его объема.
18. Определите показатель политропы.
19. Рассчитайте количество теплоты, полученное газом, работу газа и его молярную теплоемкость.
20. Проанализируйте, является ли процесс политропным.

### **Изохорное нагревание газа**

21. Добейтесь, чтобы температура изучаемого газа стала равна  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
22. Отрегулируйте начальный уровень глицерина в трубке.
23. Нагрейте газ и измерьте положения уровней глицерина в трубке.
24. Увеличьте количество глицерина в трубке так, чтобы газ занял прежний объем.
25. Повторите опыт несколько раз.
26. Для каждого опыта рассчитайте объем и давление газа до и после добавления глицерина.
27. Постройте график зависимости давления газа от его температуры.
28. Из коэффициента пропорциональности между давлением и температурой рассчитайте количество газа.
29. Рассчитайте количество теплоты, полученное газом, работу газа и его молярную теплоемкость.

### **Изобарное расширение**

30. Добейтесь, чтобы температура изучаемого газа стала равна  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
31. Отрегулируйте начальный уровень глицерина в трубке.
32. Нагрейте газ и измерьте положения уровней глицерина в трубке.
33. Уменьшите количество глицерина в трубке так, чтобы восстановить прежнее давление газа.
34. Повторите опыт несколько раз.
35. Для каждого опыта рассчитайте объем и давление газа до и после изменения количества глицерина.

36. Постройте график зависимости объема газа от его температуры.

37. Из коэффициента пропорциональности между объемом и температурой рассчитайте количество газа.

38. Рассчитайте количество теплоты, полученное газом, работу газа и его молярную теплоемкость.

39. Вычислите относительную погрешность молярной теплоемкости газа при постоянном объеме и при постоянном давлении.

40. Сделайте выводы.

## 4.2. Подробное описание хода работы

При выполнении работы рекомендуется следующая последовательность действий:

1. Раскрывающийся список на панели *«Газ»* содержит газы, обладающие различными теплоемкостями: пропан, этан, этилен, ацетон, аммиак, метан, сероводород, хлор, кислород, водород, азот, гелий, аргон. Выберите газ, поведение которого будет изучаться в эксперименте (по указанию преподавателя). Для выбранного газа под списком автоматически указываются молярная масса и молярная теплоемкость при постоянном давлении. Все газы, используемые в работе, считаются идеальными, а их молярные теплоемкости при постоянном давлении – постоянными.

2. S-образная теплопроводящая трубка, используемая в эксперименте, расположена в вертикальной плоскости и состоит из пяти прямолинейных перпендикулярных друг другу отрезков – трех вертикальных и двух горизонтальных.

Слева от области эксперимента расположена вертикальная линейка для измерения уровней глицерина в трубке. Горизонтальная линейка в области эксперимента отсутствует. Поэтому длины горизонтальных отрезков трубки указаны около них в области эксперимента. Длины вертикальных отрезков трубки можно измерить с помощью имеющейся линейки.

Раскрывающийся список на панели *«Масштаб»* позволяет изменять масштаб отображения области эксперимента от 100 до 500%. При этом цена деления линейки изменяется от 0,71 до 0,15 см. Чтобы максимально точно измерить длины вертикальных отрезков трубки, с помощью раскрывающегося списка *«Масштаб»* максимально увеличьте изображение экспериментальной установки. При этом вертикальная и горизонтальная полосы прокрутки, расположенные справа и снизу от области эксперимента, станут доступными.

Начало отсчета линейки совпадает с верхним уровнем нижнего горизонтального отрезка трубки. Поэтому для измерения длины открытого вертикального отрезка трубки, заканчивающегося на границе области эксперимента, достаточно определить только положение верхнего края этого отрезка трубки. Учитывая цену деления линейки, указанную на панели *«Масштаб»*, определите длину открытого вертикального отрезка трубки.

Отрезок трубки, в котором расположена граница между газом и глицерином, необходимо измерить между верхней границей нижнего и нижней границей верхнего горизонтальных отрезков. Верхняя граница нижнего горизонтального отрезка трубки совпадает с началом отсчета линейки. Поэтому для определения длины вертикального отрезка трубки, содержащего границу между газом и глицерином, достаточно измерить положение нижнего уровня верхнего горизонтального отрезка.

Слева от линейки расположен ползунок **«Измерение высоты»**, оборудованный синхронизованной с ним измерительной линией. Перемещая ползунок, совместите измерительную линию с серединой нижней стенки верхнего горизонтального отрезка трубки. Учитывая цену деления, запишите длину вертикального отрезка трубки, содержащего границу между газом и глицерином.

В измерении длины последнего вертикального отрезка трубки, соединяющего ее с резервуаром, нет необходимости, так как она указана около трубки.

После окончания измерений вернитесь к масштабу отображения области эксперимента 100 % с помощью раскрывающегося списка на панели **«Масштаб»**.

Используя измеренные значения, выполните следующие вспомогательные расчеты.

Для упрощения вычислений объем, занимаемый газом, можно условно разбить на две части: 1) объем газа в отрезке трубки, содержащем границу между газом и глицерином; 2) остальной объем. Во всех опытах на данной экспериментальной установке изменение объема газа происходит только за счет первой части. Вторая часть объема не изменяется. Эта часть (назовем ее постоянной) состоит из объема: резервуара, верхнего горизонтального отрезка трубки и соединяющего их вертикального отрезка. Зная площадь поперечного сечения  $S$ , длины отрезков трубки  $L_1$  и  $L_2$  и объем резервуара  $V_p$ , указанный в области эксперимента, вычислите неизменяемую (постоянную) часть объема газа:

$$V_0 = V_p + S(L_1 + L_2).$$

Если граница между газом и глицерином находится на высоте  $h_2$ , то объем, занимаемый газом в этом вертикальном отрезке трубки, можно рассчитать  $S(H - h_2)$ , где  $H$  – высота вертикального отрезка трубки, содержащего границу между газом и глицерином. Тогда для вычисления объема, занимаемого газом, можно воспользоваться формулой:

$$V = V_0 + S(H - h_2).$$

Вычислите неизменяемую при использовании данной экспериментальной установки часть объема газа.

### **Изотермическое сжатие газа**

Для изучения изотермического процесса на данной экспериментальной установке необходимо изменять количество глицерина в трубке без теплообмена между газом и водой в калориметре. При этом термодинамическая система будет незамкнутой, а термодинамический процесс будет протекать без подведения теплоты и без изменения температуры газа.

Перед началом эксперимента необходимо задать начальные условия (температуру газа и объем глицерина в трубке).

3. Обратите внимание, что имеющийся в эксперименте термометр показывает только температуру воды в калориметре. Температуру газа можно определить только по температуре воды, когда после окончания теплового обмена в калориметре они станут одинаковыми. Поэтому добиться, чтобы температура газа стала равна 20 °С, можно следующим образом.

С помощью счетчика **«Температура»** на панели **«Теплоизолированный резервуар (калориметр)»** задайте температуру воды в калориметре равной 20 °С. При этом теплопроводящая перегородка должна быть НЕ установлена.

С помощью переключателя **«Установлена»** на панели **«Теплоизолированный резервуар (калориметр)»** – **«Теплопроводящая перегородка (медь)»** установите в калориметр теплопроводящую перегородку. В результате в калориметре

начнется теплообмен. Наблюдайте за показаниями термометра, регистрирующего температуру воды в калориметре. Если температура воды изменяется, значит, до начала теплообмена температура газа отличалась от температуры воды. Когда теплообмен закончится, температура воды прекратит изменяться, переключатель, кнопки, раскрывающиеся списки вновь станут доступны.

Если после теплообмена температура воды изменилась, с помощью переключателя *«Установлена»* извлеките теплопроводящую перегородку из калориметра, с помощью счетчика *«Температура»* вновь задайте температуру воды равной 20 °С. Затем опять установите теплопроводящую перегородку в калориметр.

Повторяйте эти действия, пока температура воды в калориметре при теплообмене не перестанет меняться. Это будет означать, что температура газа также достигла 20 °С.

4. Для изотермического сжатия газа предстоит постепенно увеличивать количество глицерина в трубке. Чтобы получить достаточное количество экспериментальных данных, необходимо добиться минимального начального уровня глицерина в трубке.

Счетчик *«Изменить количество жидкости на...»* и кнопки *«Увеличить»*, *«Уменьшить»* на панели *«Жидкость в трубке (глицерин)»* позволяют регулировать количество глицерина в трубке. Для этого необходимо, выбрав с помощью счетчика нужное количество жидкости (от 5 до 500 мл), нажать соответствующую кнопку. В результате количество жидкости резко изменится в открытом вертикальном отрезке трубки. Установившееся ранее равновесие нарушится (неравновесное состояние), жидкость начнет двигаться, пока не достигнет нового положения равновесия (равновесное состояние). Во время движения жидкости кнопки, счетчики, раскрывающиеся списки, имеющиеся в работе, будут недоступны.

С помощью счетчика *«Изменить количество жидкости на...»* выберите максимально возможное количество глицерина. Нажмите кнопку *«Уменьшить»*. После прекращения колебаний глицерина в трубке обратите внимание на уровень глицерина в открытом вертикальном отрезке трубки.

Необходимо добиться, чтобы в равновесном состоянии уровень глицерина в открытом вертикальном отрезке трубки был **меньше 1/16 от его длины** (например, если длина открытого вертикального отрезка трубки, измеренная при выполнении пункта 2, равна 160 см, то необходимо добиться, чтобы начальный уровень глицерина в этом отрезке трубки был меньше 9–10 см). Если в стационарном состоянии уровень глицерина выше требуемого положения, продолжайте уменьшать количество глицерина, используя счетчик *«Изменить количество жидкости на...»* и кнопку *«Уменьшить»*.

После достижения необходимого начального уровня глицерина в трубке с помощью раскрывающегося списка на панели *«Масштаб»* максимально (500 %) увеличьте отображение области эксперимента и измерьте положения уровней глицерина в трубке. Для этого с помощью ползунка *«Измерение высоты»* совместите измерительную линию сначала с границей между глицерином и атмосферой в открытом вертикальном отрезке трубки. Учтя цену деления, выполните отсчет высоты по линейке. Затем совместите измерительную линию с границей между глицерином и газом в другом вертикальном отрезке трубки. Выполните отсчет высоты по линейке.

ИЗМЕРЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЗАПИШИТЕ В ТАБЛИЦУ 1.

Обратите внимание, что измерение уровней глицерина в трубке необходимо проводить только для стационарного состояния глицерина, которое соответствует равновесному состоянию идеального газа в трубке.

5. Для изучения изотермического сжатия газа путем увеличения количества глицерина в трубке необходимо рассчитать объем глицерина, который предстоит добавлять в трубку в каждом опыте.

При добавлении глицерина будут изменяться уровни в обоих вертикальных отрезках трубки. Вертикальный отрезок, в котором находится граница между глицерином и газом, короче, поэтому для расчета используйте его высоту  $H$ . Для выполнения 15 измерений добавочный объем глицерина  $\Delta V$  рассчитайте по формуле:

$$\Delta V = H \cdot S / 12,$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения трубки. В работе изменять количество глицерина, добавляемого в трубку, можно с шагом 5 мл. Поэтому полученное значение добавочного объема округлите до 5 мл в меньшую сторону (чтобы избежать затекания глицерина в верхний горизонтальный отрезок трубки).

6. Не изменяя температуру воды в калориметре, с помощью счетчика **«Изменить количество жидкости на...»** задайте рассчитанный при выполнении пункта 5 добавочный объем глицерина и не изменяйте его далее во всех опытах по изотермическому сжатию газа. С помощью кнопки **«Увеличить»** добавьте рассчитанную порцию глицерина. После восстановления равновесия глицерина в трубке, используя измерительную линию, измерьте положения уровней глицерина в трубке в масштабе отображения области эксперимента 500 %.

Для этого с помощью ползунка **«Измерение высоты»** совместите измерительную линию сначала с границей между глицерином и атмосферой в открытом вертикальном отрезке трубки. Учитывая цену деления, выполните отсчет высоты по линейке. Затем совместите измерительную линию с границей между глицерином и газом в другом вертикальном отрезке трубки. Выполните отсчет высоты по линейке.

**ИЗМЕРЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЗАПИШИТЕ В ТАБЛИЦУ 1.**

Помните, что измерение уровней глицерина в трубке необходимо проводить только для стационарного состояния глицерина, которое соответствует равновесному состоянию идеального газа в трубке.

7. Повторяйте действия, описанные в пункте 6, до тех пор, пока один из уровней глицерина не достигнет максимального положения. Если добавочный объем рассчитан правильно, в данной серии опытов должно получиться 15 измерений (равновесных состояний идеального газа), включая измерения, сделанные при выполнении пункта 4.

8. Используя вычисленную при выполнении пункта 2 неизменяемую часть объема  $V_0$ , для каждого из проведенных измерений рассчитайте объем газа:  $V = V_0 + S(H - h_2)$ , где  $h_2$  – высота уровня глицерина в вертикальном отрезке трубки, содержащем границу между газом и глицерином,  $H$  – длина этого отрезка трубки.

Зная внешнее атмосферное давление ( $p_0 = 1 \text{ атм} = 1,0132 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ), для каждого из проведенных измерений рассчитайте также давление газа:  $p = p_0 + \rho g(h_1 - h_2)$ , где  $(h_1 - h_2)$  – разность уровней глицерина в вертикальных отрезках трубки.

Учитывая, что измерение уровней глицерина проводилось с точностью до половины цены деления линейки (0,075 см в масштабе 500 %), расчеты объема и давления следует проводить с точностью до четырех значащих цифр.

9. Постройте график зависимости давления газа от его объема.

10. Количество газа, используемого в эксперименте, определите двумя способами:

1) для каждого из проведенных измерений (равновесных состояний) из уравнения Менделеева–Клапейрона вычислите количество газа с точностью до четырех значащих цифр. Рассчитайте среднее значение количества газа;

2) постройте график зависимости давления от величины, обратной объему,  $p = p(1/V)$ . При изотермическом процессе этот график должен носить линейный характер. Из уравнения Менделеева–Клапейрона следует, что тангенс угла наклона этого графика равен  $\nu RT$  ( $T$  – температура газа в Кельвинах,  $R$  – универсальная газовая постоянная). Обратите внимание, что абсолютная температура (по шкале Кельвина) выше температуры по шкале Цельсия на  $273,15^\circ$ . По графику определите тангенс угла наклона и рассчитайте количество газа  $\nu$  также с точностью до четырех значащих цифр.

Сравните значения количества газа, полученные обоими способами. В дальнейших расчетах используйте среднее значение количества газа, рассчитанное первым способом.

Используя значение молярной массы газа, которое указывалось на панели «Газ» при выполнении пункта 1, вычислите массу газа.

11. При изотермическом сжатии газ переходит из состояния  $(p', V')$  в предыдущем опыте в состояние  $(p, V)$  в последующем опыте при постоянной температуре  $T$ . В этом случае работу, совершаемую газом, можно вычислить двумя способами:

1) как работу при изотермическом процессе:  $A = \nu RT \ln \frac{V'}{V}$ ;

2) по определению работы (если изменение давления в каждом опыте мало):

$$A = \int p dV \approx \bar{p}(V - V') = \frac{1}{2}(p + p')(V - V').$$

Для всех выполненных измерений рассчитайте работу газа обоими способами с точностью до четырех значащих цифр. Используйте среднее значение количества газа, вычисленное при выполнении пункта 10. Сравните значения работы газа, рассчитанные разными способами. Проанализируйте, насколько точными в данном случае можно считать расчеты, выполненные с помощью приближенной формулы (по определению).

Изменение состояния газа в проведенных опытах происходит не за счет теплоты, а за счет работы внешних сил – работы, совершаемой при перемещении в трубке идеальной несжимаемой жидкости (глицерина). Для каждого опыта рассчитайте работу, совершаемую над газом внешними силами:

$$A_{вн} = (Sp' + \rho g(\Delta V/2 - S\Delta h))\Delta h,$$

где  $\Delta V$  – объем глицерина, добавляемый в трубку в каждом опыте;  $\Delta h = (h_2 - h'_2)$  – изменение уровня глицерина в вертикальном отрезке трубки, содержащем границу между глицерином и изучаемым идеальным газом ( $h'_2$  – перед,  $h_2$  – после добавления глицерина);  $p'$  – давление газа перед добавлением глицерина.

Все вычисления необходимо выполнять с точностью до четырех значащих цифр.

Сравните значения работы, совершаемой газом при изотермическом процессе, с работой внешних сил. Сделайте вывод.

### Расширение газа при нагревании

Для изучения расширения газа при нагревании на данной экспериментальной установке необходимо изменять температуру газа за счет теплообмена с водой в калориметре без изменения количества глицерина в трубке. При этом термодинамическая система будет замкнутой.

Перед началом эксперимента необходимо задать начальные условия (температура газа и объем глицерина в трубке).

12. С помощью раскрывающегося списка на панели «*Масштаб*» выберите масштаб отображения области эксперимента равный 100 %. Используя счетчик «*Температура*» и переключатель «*Установлена*» (теплопроводящая перегородка) на панели «*Теплоизолированный резервуар (калориметр)*», действуя способом, аналогичным описанному в пункте 3, добейтесь, чтобы температура газа стала равна 5 °С.

Обратите внимание, что при охлаждении газ сжимается, и уровень глицерина в вертикальном отрезке трубки, содержащем границу между газом и глицерином, будет повышаться. Поэтому, чтобы избежать попадания глицерина в верхний горизонтальный отрезок трубки, в процессе охлаждения газа может потребоваться изменение количества глицерина в трубке. В этом случае используйте счетчик «*Изменить количество жидкости на...*» и кнопки «*Увеличить*», «*Уменьшить*».

13. При нагревании газ расширяется, следовательно, в предстоящих опытах уровень глицерина (идеальной несжимаемой жидкости) в открытом вертикальном отрезке трубки будет повышаться. Чтобы получить в этих опытах достаточное количество экспериментальных данных, необходимо добиться минимального начального уровня глицерина в трубке.

Используя счетчик «*Изменить количество жидкости на...*» и кнопки «*Увеличить*», «*Уменьшить*», добейтесь, чтобы для стационарного состояния глицерина его уровень в открытом вертикальном отрезке трубки был **меньше 1/16 от его длины** (например, если длина открытого вертикального отрезка трубки, измеренная при выполнении пункта 2, равна 160 см, то необходимо добиться, чтобы начальный уровень глицерина в этом отрезке трубки был меньше 9–10 см).

С помощью раскрывающегося списка на панели «*Масштаб*» максимально (500 %) увеличьте отображение области эксперимента и измерьте положения уровней глицерина в трубке. Для этого с помощью ползунка «*Измерение высоты*» совместите измерительную линию сначала с границей между глицерином и атмосферой в открытом вертикальном отрезке трубки. Учтя цену деления, выполните отсчет высоты по линейке. Затем совместите измерительную линию с границей между глицерином и газом в другом вертикальном отрезке трубки. Выполните отсчет высоты по линейке.

#### ИЗМЕРЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЗАПИШИТЕ В ТАБЛИЦУ 2.

Помните, что измерение уровней глицерина в трубке необходимо проводить только для стационарного состояния глицерина, которое соответствует равновесному состоянию идеального газа в трубке.

Не изменяйте количество глицерина в трубке во всех опытах по изучению расширения газа при нагревании.

14. С помощью переключателя «*Установлена*» извлеките теплопроводящую перегородку из калориметра. Счетчик «*Температура*» на панели «*Теплоизолированный резервуар (калориметр)*» станет доступным. С его помощью увеличьте температуру воды на 10 °С. Это будет начальное значение температуры воды в предстоящем теплообмене. Начальное значение температуры газа в предстоящем теплообмене соответствует температуре, установившейся в калориметре в предыдущем теплообмене.

ЗАПИШИТЕ ЗНАЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА И ВОДЫ ДО НАЧАЛА ТЕПЛООБМЕНА В ТАБЛИЦУ 2.

С помощью переключателя «Установлена» установите теплопроводящую перегородку в калориметр. Счетчик «Температура» на панели «Теплоизолированный резервуар (калориметр)», а также другие счетчики, кнопки, раскрывающиеся списки и переключатель станут недоступными – начнется теплообмен, температура воды начнет меняться, а газ – расширяться (неравновесное состояние). Теплообмен закончится, когда температура воды в калориметре перестанет меняться (равновесное состояние). Счетчики, кнопки, раскрывающиеся списки, переключатель вновь станут доступными.

ЗАПИШИТЕ ЗНАЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА И ВОДЫ ПОСЛЕ ОКОНЧАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ТАБЛИЦУ 2.

Используя измерительную линию, определите положения уровней глицерина в трубке в масштабе отображения области эксперимента 500 %. Измерение уровней глицерина в трубке необходимо проводить только для стационарного состояния глицерина, которое соответствует равновесному состоянию идеального газа в трубке.

ИЗМЕРЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЗАПИШИТЕ В ТАБЛИЦУ 2.

15. Температуру воды в калориметре можно изменять от 5 до 95 °С. Не изменяя количество глицерина в трубке, выполните описанный в пункте 14 опыт и измерения 9 раз (включая измерения, сделанные при выполнении пункта 14), устанавливая температуру газа до начала теплообмена равной последовательно 15, 25, 35 ... 95 °С.

16. Для всех выполненных измерений (равновесных состояний) рассчитайте объем и давление газа, как описано в пункте 8.

17. Постройте график зависимости давления газа от его объема.

18. Политропный процесс описывается уравнением:  $pV^n = const$ . Константу можно выразить через давление  $p_5$  и объем газа  $V_5$  при какой-либо известной температуре, например, при 5 °С. Тогда уравнение политропного процесса можно записать в виде:  $pV^n = p_5V_5^n$  или  $\frac{p}{p_5} = \left(\frac{V}{V_5}\right)^n$ . Отсюда с помощью логарифмирования можно получить выражение:  $\ln\left(\frac{p}{p_5}\right) = n \ln\left(\frac{V}{V_5}\right)$ , которое позволяет определить показатель политропы с помощью вычисленных при выполнении предыдущего пункта значений давления и объема газа.

Поэтому по результатам каждого из проделанных опытов вычислите: 1) логарифм отношения давления газа  $p_5$  при 5 °С к давлению газа  $p$  в данном опыте; 2) логарифм отношения объема газа  $V$  в данном опыте к объему газа  $V_5$  при 5 °С.

Показатель политропного нагревания определите двумя способами:

1) для каждого из проведенных опытов рассчитайте показатель политропы  $n$  как отношение логарифмов:  $n = \frac{\ln p_5/p}{\ln V/V_5}$  (с точностью до трех значащих цифр). Сравните и проанализируйте полученные значения: можно ли в проведенных опытах показатель политропы считать константой. Если да, вычислите среднее значение показателя политропы;

2) постройте график зависимости величины  $\ln p_5/p$  от величины  $\ln V/V_5$ . При политропном процессе этот график должен носить линейный характер. Проанализируйте, можно ли считать полученный график линейным. Если да, то тангенс угла наклона этого графика равен показателю политропы. По графику определите тангенс угла наклона и рассчитайте показатель политропы.

Сравните показатели политропы, полученные двумя разными способами.

19. Для каждого выполненного опыта рассчитайте:

- количество теплоты, отданное водой:  $Q_B = m_B \cdot c_B \cdot (t_B - t_K)$ ;
- количество теплоты, полученное медной перегородкой:  $Q_M = m_M \cdot c_M \cdot (t_K - t)$ ;
- количество теплоты, полученное газом:  $Q = Q_B - Q_M$ ;
- **молярную теплоемкость** газа:  $C = \frac{Q}{\nu(t_K - t)}$ ;
- работу газа:  $A = \int p dV \approx \bar{p}(V - V') = \frac{1}{2}(p + p')(V - V')$ ;
- молярную теплоемкость газа при постоянном объеме:  $C_V = \frac{Q - A}{\nu(t_K - t)}$ ;
- молярную теплоемкость газа при постоянном давлении:  $C_P = R + C_V$ ,

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\nu$  – количество газа,  $m_B$  – масса воды в калориметре,  $m_M$  – масса медной перегородки,  $c_B, c_M$  – удельные теплоемкости воды и меди,  $t_B$  – температура воды до начала теплообмена,  $t$  – температура газа до начала теплообмена (считаем, что до начала теплообмена температура медной перегородки равна температуре газа),  $t_K$  – температура воды, газа и медной перегородки после окончания теплообмена;  $p', V'$  – давление и объем газа в предыдущем, а  $p, V$  – соответственно, в последующем опыте.

Все вычисления необходимо выполнять с точностью до четырех значащих цифр.

20. Проанализируйте, является ли процесс политропным: остается ли постоянной молярная теплоемкость  $C$  газа в процессе нагревания.

### **Изохорное нагревание газа**

Для изучения изохорного процесса на данной экспериментальной установке необходимо изменять температуру газа за счет теплообмена с водой в калориметре, добавляя в трубку глицерин для поддержания постоянного объема газа. При этом термодинамическая система будет незамкнутой. Каждый опыт будет состоять из двух последовательных этапов: 1) нагревание газа; 2) изменение количества глицерина в трубке.

Перед началом эксперимента необходимо задать начальные условия (температуру газа и объем глицерина в трубке).

21. С помощью раскрывающегося списка на панели «**Масштаб**» выберите масштаб отображения области эксперимента равный 100 %. Используя счетчик «**Температура**» и переключатель «**Установлена**» (теплопроводящая перегородка) на панели «**Теплоизолированный резервуар (калориметр)**», действуя способом, аналогичным описанному в пункте 12, добейтесь, чтобы температура газа стала равна 5 °С.

22. При нагревании газ расширяется, поэтому, чтобы в предстоящих опытах поддерживать объем газа постоянным, будет необходимо увеличивать количество глицерина в трубке. Следовательно, в предстоящих опытах с увеличением температуры газа уровень глицерина в открытом вертикальном отрезке трубки будет повышаться. Чтобы в этих опытах получить достаточное количество экспериментальных данных, необходимо добиться минимального начального уровня глицерина в трубке.

Используя счетчик «**Изменить количество жидкости на...**» и кнопки «**Увеличить**», «**Уменьшить**», добейтесь, чтобы для стационарного состояния глицерина его уровень в открытом вертикальном отрезке трубки был **меньше 1/16 от его длины** (например, если длина открытого вертикального отрезка трубки, измеренная при выполнении пункта 2, равна 160 см, то необходимо добиться, чтобы начальный уровень глицерина в этом отрезке трубки был меньше 9–10 см).

С помощью раскрывающегося списка на панели «*Масштаб*» максимально (500 %) увеличьте отображение области эксперимента.

Проанализируйте положение уровня глицерина в вертикальном отрезке трубки, который содержит границу между газом и глицерином. Выберите на линейке ближайшее удобное для запоминания и измерения значение (например, целое или полуцелое). С помощью ползунка «*Измерение высоты*» совместите измерительную линию с выбранным на линейке значением. Используя счетчик «*Изменить количество жидкости на...*» и кнопки «*Увеличить*», «*Уменьшить*», добейтесь, чтобы граница между газом и глицерином совпала с измерительной линией. Проверьте положение уровня глицерина в открытом вертикальном отрезке трубки. Если уровень глицерина в этом отрезке трубки стал выше 1/16 его длины, подберите другое удобное для запоминания (меньше предыдущего) положение границы между газом и глицерином, и вновь отрегулируйте количество глицерина (идеальной несжимаемой жидкости).

Измерьте положения обоих уровней глицерина в трубке. Измерение уровней глицерина в трубке необходимо проводить в масштабе отображения области эксперимента 500% и только для стационарного состояния глицерина, которое соответствует равновесному состоянию идеального газа в трубке.

ИЗМЕРЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЗАПИШИТЕ В ТАБЛИЦУ 3.

В дальнейшем в каждом опыте по изучению изохорного нагревания необходимо поддерживать выбранное в этом пункте положение границы между газом и глицерином. Это обеспечит постоянный объем газа.

23. Выполните первый этап опыта – нагрейте газ при фиксированном объеме глицерина. Для этого с помощью переключателя «*Установлена*» извлеките теплопроводящую перегородку из калориметра. Счетчик «*Температура*» на панели «*Теплоизолированный резервуар (калориметр)*» станет доступным. С его помощью увеличьте температуру воды на 5 °С. Это будет начальное значение температуры воды в предстоящем теплообмене. Начальное значение температуры газа в предстоящем теплообмене соответствует температуре, установившейся в калориметре в предыдущем теплообмене.

ЗАПИШИТЕ ЗНАЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА И ВОДЫ ДО НАЧАЛА ТЕПЛООБМЕНА В ТАБЛИЦУ 3.

С помощью переключателя «*Установлена*» установите теплопроводящую перегородку в калориметр. Счетчик «*Температура*» на панели «*Теплоизолированный резервуар (калориметр)*», а также другие счетчики, кнопки, раскрывающиеся списки и переключатель станут недоступными – начнется теплообмен, температура воды начнет меняться, а газ – расширяться (неравновесное состояние). Теплообмен закончится, когда температура воды в калориметре перестанет меняться (равновесное состояние). Счетчики, кнопки, раскрывающиеся списки, переключатель вновь станут доступными.

ЗАПИШИТЕ ЗНАЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА И ВОДЫ ПОСЛЕ ОКОНЧАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ТАБЛИЦУ 3.

Используя измерительную линию, определите положения уровней глицерина в трубке в масштабе отображения области эксперимента 500 %. Измерение уровней глицерина в трубке необходимо проводить только для стационарного состояния глицерина, которое соответствует равновесному состоянию идеального газа в трубке.

ИЗМЕРЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЗАПИШИТЕ В ТАБЛИЦУ 3.

24. Выполните второй этап опыта – изотермическое сжатие газа путем добавления в трубку глицерина. Для этого с помощью ползунка «Измерение высоты» установите измерительную линию в положение, выбранное при выполнении пункта 22. Увеличьте количество глицерина (идеальной несжимаемой жидкости) в трубке так, чтобы газ занял прежний объем. Для этого, используя счетчик «Изменить количество жидкости на...» и кнопки «Увеличить», «Уменьшить», добейтесь, чтобы в стационарном состоянии граница между газом и глицерином совпала с измерительной линией.

Измерьте положение обоих уровней глицерина в трубке в масштабе отображения области эксперимента 500 %.

ИЗМЕРЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЗАПИШИТЕ В ТАБЛИЦУ 3.

25. Температуру воды в калориметре можно изменять от 5 до 95 °С. Выполните описанный в пунктах 23–24 опыт и измерения 11 раз, устанавливая температуру газа до начала теплообмена равной последовательно 10, 15, 20 ... 60 °С. Каждый раз после окончания теплообмена, регулируя количество глицерина в трубке, его объем необходимо увеличивать так, чтобы газ занял прежний объем.

26. Для каждого проведенного опыта, как описано в пункте 8, рассчитайте объем и давление газа до и после добавления глицерина.

27. Постройте график зависимости давления газа от его абсолютной температуры при постоянном объеме (после добавления глицерина). Обратите внимание, что абсолютная температура (по шкале Кельвина) выше температуры по шкале Цельсия на 273,15 °.

28. При изохорном процессе график зависимости  $p = p(T)$  должен носить линейный характер. Из уравнения Менделеева–Клапейрона следует, что тангенс угла наклона этого графика равен  $\nu R/V$  ( $R$  – универсальная газовая постоянная,  $V$  – объем газа). По графику определите тангенс угла наклона и рассчитайте количество газа  $\nu$  с точностью до четырех значащих цифр.

Сравните рассчитанное количество газа со значениями, полученными при изучении изотермического процесса (пункт 10).

29. Для каждого выполненного опыта рассчитайте:

- количество теплоты, отданное водой:  $Q_B = m_B \cdot c_B \cdot (t_B - t_K)$ ;
- количество теплоты, полученное медной перегородкой:  $Q_M = m_M \cdot c_M \cdot (t_K - t)$ ;
- работу газа при изотермическом сжатии (при добавлении глицерина в трубку):

$$A = \nu RT \ln \frac{V}{V'}$$

- количество теплоты, полученное газом:  $Q = Q_B - Q_M + A$ ;
- молярную теплоемкость газа при постоянном объеме:  $C = C_V = \frac{Q}{\nu(t_K - t)}$ ;
- молярную теплоемкость газа при постоянном давлении:  $C_P = R + C_V$ ,

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\nu$  – количество газа,  $m_B$  – масса воды в калориметре,  $m_M$  – масса медной перегородки,  $c_B$ ,  $c_M$  – удельные теплоемкости воды и меди,  $t_B$  – температура воды до начала теплообмена,  $t$  – температура газа до начала теплообмена (считаем, что до начала теплообмена температура медной перегородки равна температуре газа),  $t_K$  – температура воды, газа и медной перегородки после окончания теплообмена,  $V'$  – объем газа после окончания теплообмена,  $V$  – объем газа после добавления глицерина.

Все вычисления необходимо выполнять с точностью до четырех значащих цифр.

## Изобарное расширение

Для изучения изобарного процесса на данной экспериментальной установке необходимо изменять температуру газа за счет теплообмена с водой в калориметре, уменьшая количество глицерина в трубке для поддержания постоянного давления газа. При этом термодинамическая система будет незамкнутой. Каждый опыт будет состоять из двух последовательных этапов: 1) нагревание газа; 2) изменение количества глицерина в трубке.

Перед началом эксперимента необходимо задать начальные условия (температуру газа и объем глицерина в трубке).

30. С помощью раскрывающегося списка на панели «*Масштаб*» выберите масштаб отображения области эксперимента равный 100 %. Используя счетчик «*Температура*» и переключатель «*Установлена*» (теплопроводящая перегородка) на панели «*Теплоизолированный резервуар (калориметр)*», действуя способом, аналогичным описанному в пункте 12, добейтесь, чтобы температура газа стала равна 5 °С.

31. Для изучения изобарного процесса необходимо поддерживать постоянное давление газа (постоянную разность уровней глицерина в трубке). Используя имеющиеся в работе измерительные инструменты, проще поддерживать уровни глицерина на одинаковой высоте (давление газа равно атмосферному).

Используя измерительную линию, счетчик «*Изменить количество жидкости на...*» и кнопки «*Увеличить*», «*Уменьшить*», добейтесь, чтобы в стационарном состоянии уровни глицерина находились на одинаковой высоте сначала в масштабе отображения области эксперимента 100 %. Потом с помощью раскрывающегося списка на панели «*Масштаб*» максимально увеличьте масштаб отображения области эксперимента (500 %) и добейтесь более точного совпадения уровней глицерина в трубке.

ЗАПИШИТЕ ПОЛОЖЕНИЯ УРОВНЕЙ ГЛИЦЕРИНА В ТРУБКЕ В ТАБЛИЦУ 3.

32. Выполните первый этап опыта – также как описано в пункте 23, нагрейте газ и измерьте положения уровней глицерина в трубке, которые при нагревании газа изменятся.

33. Выполните второй этап опыта – изотермическое расширение газа. Для этого уменьшите количество глицерина в трубке так, чтобы восстановить прежнее давление газа. Используя счетчик «*Изменить количество жидкости на...*» и кнопки «*Увеличить*», «*Уменьшить*», добейтесь, чтобы в стационарном состоянии глицерина его уровни в вертикальных отрезках трубки находились на одинаковой высоте в масштабе 500 %. Измерьте положение уровней глицерина в трубке.

ЗНАЧЕНИЯ, ИЗМЕРЕННЫЕ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПУНКТОВ 32–33, ЗАПИШИТЕ В ТАБЛИЦУ 3.

34. Температуру воды в калориметре можно изменять от 5 до 95 °С. Выполните описанный в пунктах 32–33 опыт и измерения 11 раз, устанавливая температуру газа до начала теплообмена равной последовательно 10, 15, 20 ... 60 °С. Каждый раз после окончания теплообмена, регулируя количество глицерина в трубке, его объем необходимо уменьшать так, чтобы восстановить прежнее (равное атмосферному) давление газа.

35. Для каждого проведенного опыта, как описано в пункте 8, рассчитайте объем и давление газа до и после изменения количества глицерина.

36. Постройте график зависимости объема газа от его абсолютной температуры при постоянном давлении (после уменьшения количества глицерина). Обратите внимание, что абсолютная температура (по шкале Кельвина) выше температуры по шкале Цельсия на  $273,15^\circ$ .

37. При изобарном процессе график зависимости  $V = V(T)$  должен носить линейный характер. Из уравнения Менделеева–Клапейрона следует, что тангенс угла наклона этого графика равен  $\nu R/p$  ( $R$  – универсальная газовая постоянная,  $p = p_0$  – давление газа). По графику определите тангенс угла наклона и рассчитайте количество газа  $\nu$  с точностью до четырех значащих цифр.

Сравните количество газа со значениями, полученными при изучении изотермического процесса (пункт 10).

38. Для каждого выполненного опыта рассчитайте:

- количество теплоты, отданное водой:  $Q_B = m_B \cdot c_B \cdot (t_B - t_K)$ ;
- количество теплоты, полученное медной перегородкой:  $Q_M = m_M \cdot c_M \cdot (t_K - t)$ ;
- работу газа при изотермическом сжатии (при изменении количества глицерина в трубке):  $A = \nu RT \ln \frac{V}{V'}$ ;
- количество теплоты, полученное газом:  $Q = Q_B - Q_M + A$ ;
- **молярную теплоемкость газа при постоянном давлении:**  $C = C_P = \frac{Q}{\nu(t_K - t)}$ ;
- молярную теплоемкость газа при постоянном объеме:  $C_V = C_P - R$ ,

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\nu$  – количество газа,  $m_B$  – масса воды в калориметре,  $m_M$  – масса медной перегородки,  $c_B$ ,  $c_M$  – удельные теплоемкости воды и меди,  $t_B$  – температура воды до начала теплообмена,  $t$  – температура газа до начала теплообмена (считаем, что до начала теплообмена температура медной перегородки равна температуре газа),  $t_K$  – температура воды, газа и медной перегородки после окончания теплообмена,  $V'$  – объем газа после окончания теплообмена,  $V$  – объем газа после изменения количества глицерина.

Все вычисления необходимо выполнять с точностью до четырех значащих цифр.

39. Молярная теплоемкость газа при постоянном давлении была определена в трех сериях опытов: при «политропном», изобарном и изохорном процессах. По результатам этих трех серий опытов рассчитайте среднее значение  $\langle C_P \rangle$  молярной теплоемкости газа при постоянном давлении. Теоретическое значение  $C_{P\ TEOP}$  молярной теплоемкости изучаемого газа при постоянном давлении указывается на панели «Газ» (при выборе газа в пункте 1). Вычислите относительную погрешность молярной теплоемкости газа при постоянном давлении:

$$\delta C_P = \frac{|\langle C_P \rangle - C_{P\ TEOP}|}{C_{P\ TEOP}} \cdot 100\%.$$

При «политропном», изобарном и изохорном процессах была рассчитана также молярная теплоемкость при постоянном объеме. По результатам этих трех серий опытов рассчитайте среднее значение  $\langle C_V \rangle$  молярной теплоемкости газа при постоянном объеме. Теоретическое значение  $C_{V\ TEOP}$  молярной теплоемкости изучаемого газа при постоянном объеме можно получить, зная теоретическое значение молярной теплоемкости газа при постоянном давлении:  $C_{V\ TEOP} = C_{P\ TEOP} - R$ . Вычислите относительную погрешность молярной теплоемкости газа при постоянном объеме:

$$\delta C_V = \frac{|\langle C_V \rangle - C_{V\ TEOP}|}{C_{V\ TEOP}} \cdot 100\%.$$

40. Сделайте выводы:

Одинакова ли работа газа и работа внешних сил в изотермическом процессе, наблюдавшемся на данной экспериментальной установке? Почему?

Можно ли считать процесс нагревания газа в условиях данного эксперимента политропным? Остается ли постоянной молярная теплоемкость газа? показатель политропы?

За счет чего (работы, теплоты) происходит изменение состояния газа при изотермическом процессе?

За счет чего (работы, теплоты) происходит изменение состояния газа при нагревании?

За счет чего (работы, теплоты) происходит изменение состояния газа при изохорном процессе?

За счет чего (работы, теплоты) происходит изменение состояния газа при изобарном процессе?

Как изменятся графики (тангенс угла наклона) изотропных процессов (изотермического, изобарного, изохорного) с изменением количества газа?

Какой из изученных в эксперименте термодинамических процессов (изобарный, изохорный или «политропный») обладает большей молярной теплоемкостью?

Зависит ли молярная теплоемкость газа изученных в эксперименте термодинамических процессов (изобарного, изохорного, «политропного») от температуры? Какой вывод можно из этого сделать: является ли изученный в эксперименте газ идеальным?

Совпадают ли теоретические и экспериментальные значения молярной теплоемкости газа при постоянном давлении? Почему?

Совпадают ли теоретические и экспериментальные значения молярной теплоемкости газа при постоянном объеме? Почему?

## 5. Контрольные вопросы

1. Что такое идеальный газ?
2. Как можно изменить состояние идеального газа?
3. Каким уравнением описывается состояние идеального газа?
4. Что такое термодинамический процесс?
5. Какие термодинамические процессы называются изотропными? политропными?
6. Как рассчитать работу идеального газа при изотропных, политропных процессах?
7. Что такое удельная теплоемкость газа? Что такое молярная теплоемкость газа?
8. Как связаны молярные теплоемкости идеального газа при постоянном давлении и при постоянном объеме?
9. Как рассчитать работу газа при неизвестном термодинамическом процессе, сопровождающемся малым изменением давления газа?
10. Как определить давление и объем газа в изогнутой трубке с одним закрытым концом, частично заполненной жидкостью?
11. Как рассчитать количество теплоты, полученное газом при теплообмене с водой и медной перегородкой в калориметре, если система замкнута? если система незамкнута?

12. Опишите порядок выполнения работы.

**Таблица 1**

№	Уровни глицерина		Давление газа $p$ , $10^5$ Па	Объем газа $V$ , мл ( $\text{см}^3$ )	Количество газа $\nu$ , моль	Работа газа $A$ , Дж
	$h_1$ , см	$h_2$ , см				
1						
...						

**Таблица 2**

№	До нагревания		После нагревания	Уровни глицерина		Давление газа $p$ , $10^5$ Па	Объем газа $V$ , мл ( $\text{см}^3$ )	Работа газа $A$ , Дж	Количество теплоты $Q$ , Дж	Молярная теплоемкость $C$ , Дж/(моль·К)
	температура газа $t$ , °С	температура воды $t_B$ , °С		температура газа и воды $t_K$ , °С	$h_1$ , см					
1										
...										

**Таблица 3**

№	До нагревания		После нагревания	Уровни глицерина		Давление газа $p'$ , $10^5$ Па	Объем газа $V'$ , мл ( $\text{см}^3$ )	Объем глицерина, мл ( $\text{см}^3$ )	Уровни глицерина		Давление газа $p$ , $10^5$ Па	Объем газа $V$ , мл ( $\text{см}^3$ )	Работа газа $A$ , Дж	Количество теплоты $Q$ , Дж	Молярная теплоемкость $C$ , Дж/(моль·К)
	температура газа $t$ , °С	температура воды $t_B$ , °С		температура газа и воды $t_K$ , °С	$h_1$ , см				$h_2$ , см	$h_1$ , см					
1															
...															

Учебное издание

РЕВИНСКАЯ Ольга Геннадьевна  
КРАВЧЕНКО Надежда Степановна

## ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Учебно-методическое пособие по изучению моделей физических процессов и явлений на компьютере с помощью лабораторной работы № МодТ–06 для студентов всех специальностей

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати \_\_.\_\_.2022. Формат 60x84/16. Бумага «Классика».  
Печать RISO. Усл.печ.л. 1,86. Уч.-изд.л. 1,68.  
Заказ . Тираж 30 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru