

$R = 8,314462 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$ – _____

Газ считается *реальным*, если _____

Уравнение Ван-дер-Ваальса

где константы Ван-дер-Ваальса: b – _____

a – _____

Первое начало термодинамики:

Адиабатное расширение газа – это _____

Способы адиабатного расширения:

1) $dA = 0$ и $dA_{\text{вн}} = 0$ – _____

2) $dA \neq 0$ и $dA_{\text{вн}} = 0$ – _____

3) $dA \neq 0$ и $dA_{\text{вн}} \neq 0$ – _____

Изменение температуры газа Ван-дер-Ваальса:

при адиабатном расширении в пустоту $dT = k_{\text{пуст}} dV_{\mu} =$

газ _____ (остывает/нагревается)

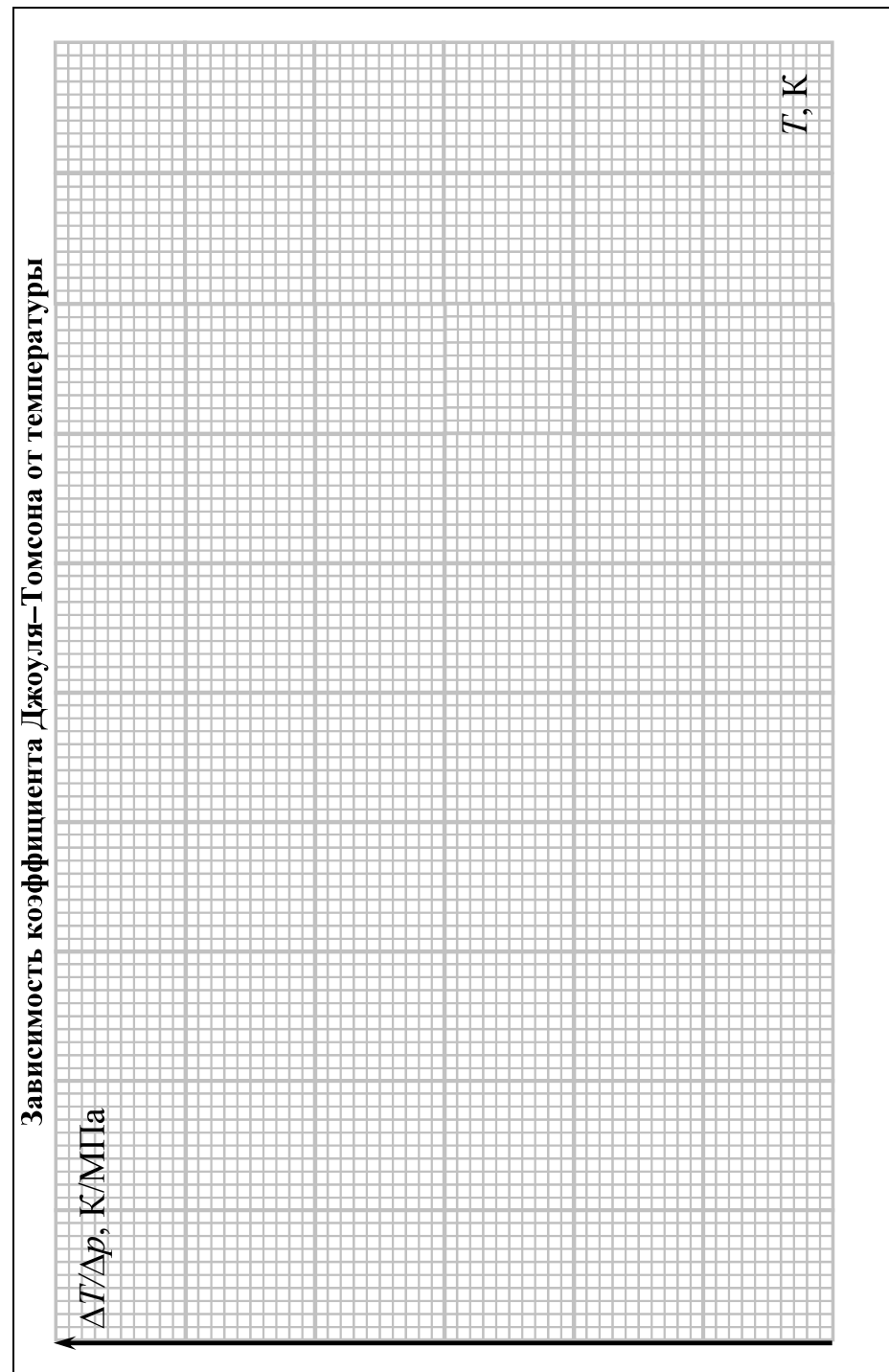
при адиабатном расширении под поршнем $dT = k_{\text{порш}} dV_{\mu} =$

газ _____ (остывает/нагревается)

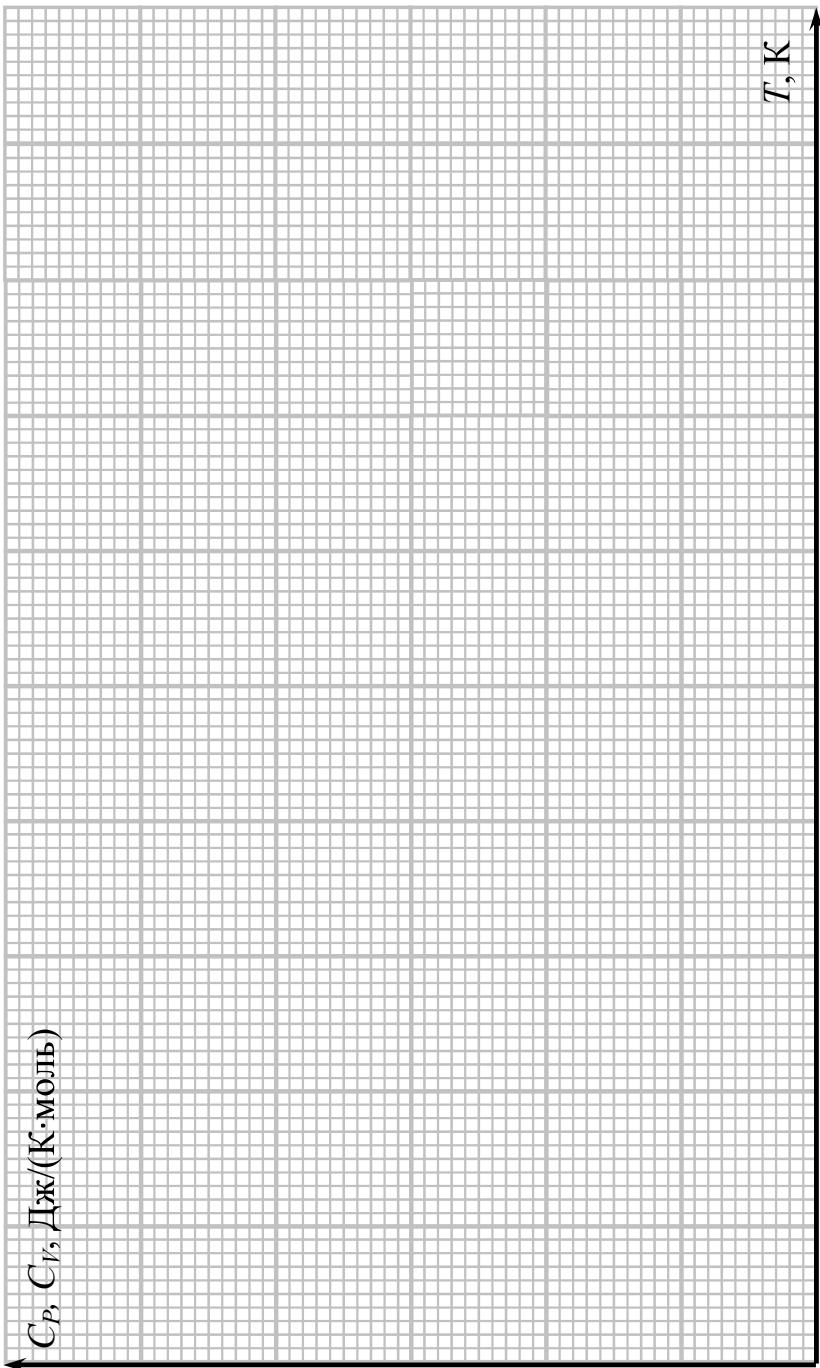
при адиабатном расширении через дроссель $dT = k_{\text{Дж-Т}} dp =$

газ _____ (остывает/нагревается)

$T_{\text{ИНВ}} =$ – это _____



Зависимость C_p и C_v от температуры



Обозначения: ... — из табл. 3 и 4; ... — из табл.5

МодТ-07

Рабочие формулы:

$$\beta = 1 - \frac{b}{V_{\mu}} - \underline{\hspace{10em}}$$

Вычисление констант Ван-дер-Ваальса из термодинамических параметров газа:

$$\beta = \hspace{10em} b = V_{\mu 1}(1 - \beta) \hspace{10em} a =$$

где $p_1 = \underline{\hspace{2em}}$ $V_{\mu 1} = \underline{\hspace{2em}}$ $T_1 = \underline{\hspace{2em}}$

p_1 доп. — T_1 доп. — $\underline{\hspace{10em}}$

Вычисление констант Ван-дер-Ваальса из температуры инверсии адиабатного расширения газа через дроссель

$$z = \hspace{10em} \beta = \hspace{10em} b = V_{\mu}(1 - \beta) \hspace{10em} a =$$

где $T_{инв} = \underline{\hspace{2em}}$ $p = \underline{\hspace{2em}}$ $V_{\mu} = \underline{\hspace{2em}}$

Вычисление молярных теплоемкостей C_p и C_v из адиабатного расширения газа Ван-дер-Ваальса через дроссель

$$C_p = \hspace{10em} C_p - C_v =$$

$$C_v = C_p - (C_p - C_v).$$

Вычисление констант Ван-дер-Ваальса и молярных теплоемкостей C_p и C_v из адиабатного расширения газа

в пустоту: $b = \hspace{10em} C_v =$

и под поршнем: $a = \hspace{10em} C_p - C_v =$

$$C_p = C_v + (C_p - C_v).$$

Эксперимент

В данной работе с помощью средств компьютерной графики моделируется поведение реального газа при разных способах адиабатного расширения: в пустоту, под поршнем и через дроссель. Газ находится в резервуаре с постоянной площадью поперечного сечения.

Начальные данные

Вариант:

Газ	Молярная масса μ, г/моль	Молярные теплоемкости (при температуре 298,15 К и давлении 1 атм)	
название		$C_p =$	Дж/(моль·К)
формула		$C_v =$	Дж/(моль·К)

Рабочий диапазон:

температуры:	К	давления:	МПа
---------------------	----------	------------------	------------

Контрольные температуры: $T_{K1} =$ _____ К $T_{K2} =$ _____ К

Площадь поперечного сечения резервуара $s =$ _____ см²

Геометрические размеры левого отсека резервуара:

Длина $L_1 =$ _____ см **Объем** $V_{рез} =$ _____ см³

Упражнение 1. Изотермы реального газа

_____ моль – количество газа, при котором в левом отсеке резервуара давление газа равно 0,1 МПа (≈ 1 атм) при меньшей из контрольных температур T_{K1} .

Таблица 1

Температура $T_1 = T_{K1}$: _____ К		$a =$ _____ Дж·см ³ /моль ²		$b =$ _____ см ³ /моль		
Количество газа ν , моль	* Молярный объем $V_{\mu 1}$, см ³ /моль	Давление p_1 , МПа	** Давление идеального газа $p_{ид}$, МПа	$p_1 - p_{ид}$, МПа	*** Давление Ван-дер-Ваальса $p_{ВДВ}$, МПа	$p_1 - p_{ВДВ}$, МПа

Температура $T_1 = T_{K2}$: _____ К		$a =$ _____ Дж·см ³ /моль ²		$b =$ _____ см ³ /моль		
ν , моль	* $V_{\mu 1}$, см ³ /моль	p_1 , МПа	** $p_{ид}$, МПа	$p_1 - p_{ид}$, МПа	*** $p_{ВДВ}$, МПа	$p_1 - p_{ВДВ}$, МПа

* $V_{\mu 1} = \frac{V_{рез}}{\nu} = \frac{sL_1}{\nu}$; ** $p_{ид} = \frac{RT_1}{V_{\mu 1}}$; *** $p_{ВДВ} = \frac{RT_1}{V_{\mu 1} - b} - \frac{a}{V_{\mu 1}^2}$

a и b – значения из упр. 3 (разные для каждой из температур T_{K1} и T_{K2})

T_1	p_1	L_2	* $V_{\mu 2}$	T_2	p_2	ΔT	$\frac{\Delta T}{\Delta p}$	T_1 доп	p_1 доп	β	b	a	C_p	$C_p - C_v$	C_v

* $V_{\mu 2} = \frac{V_{рез}}{\nu(1 - \frac{2cm}{L_1})} = \frac{sL_2}{\nu(1 - \frac{2cm}{L_1})}$; $\beta = \frac{R(T_1 \text{ доп} - T_1)}{V_{\mu 1}(p_1 \text{ доп} - p_1)}$; $b = V_{\mu 1}(1 - \beta)$; $a = V_{\mu 1}^2 \left(\frac{RT_1}{V_{\mu 1}} - p_1 \right)$;

$C_p - C_v = \frac{R}{1 - \frac{2a\beta^2}{RT_1 V_{\mu 1}}}$; $C_p = -V_{\mu 1} \left(1 - \frac{\beta}{1 - \frac{2a\beta^2}{RT_1 V_{\mu 1}}} \right) \frac{\Delta p}{\Delta T}$; $C_v = C_p - (C_p - C_v)$, где $V_{\mu 1}$ из упр. 1

Инверсия коэффициента Джоуля–Гомсона

Таблица 7

Интервал температур, на котором наблюдается инверсия:		Интервал, длиной 10 К:		Интервал, длиной 1 К:								
T_1 , К	p_1 , МПа	Первая левая часть на дросселировании, МПа	Длина правой части отсека L_2 , см	* $V_{\mu 2}$, см ³ /моль	T_2 , К	p_2 , МПа	$\Delta T = T_2 - T_1$, К	$\frac{\Delta T}{\Delta p}$, К/МПа	z	β	b , см ³ /моль	a , Дж·см ³ /моль ²

* $V_{\mu 2} = \frac{V_{рез}}{\nu(1 - \frac{2cm}{L_1})} = \frac{sL_2}{\nu(1 - \frac{2cm}{L_1})}$; $z = \frac{p_1 V_{\mu 1}}{RT_1}$; $\beta = \frac{1}{4z} (3 + \sqrt{9 - 8z})$; $b = V_{\mu 1}(1 - \beta)$; $a = V_{\mu 1}^2 \left(\frac{RT_1}{V_{\mu 1}} - p_1 \right)$, где $V_{\mu 1}$ из упр. 1

Температура инверсии $T_{инв} =$ _____ К

Предварительный эксперимент		Основной эксперимент					Основной эксперимент							
T_1 пр, К	T_2 пр, К	$\frac{\Delta T}{2}$, К	T_1 , К	p_1 , МПа	T_2 , К	p_2 , МПа	$T_{cp} = \frac{T_1+T_2}{2}$, К	C_V , Дж/(К·моль)	a , Дж·см ³ /моль ²	β	b , см ³ /моль	$C_p - C_V$, Дж/(К·моль)	$(C_p - C_V)/R$	C_p , Дж/(К·моль)

* $V_{рез} = s(L_1 + L_2)$; ** $V_{\mu 2} = \frac{V_{рез}}{\nu}$; *** $\frac{\Delta T}{2} = \frac{T_2 пр - T_1 пр}{2}$, **** $T_1 = T_1 пр - \frac{\Delta T}{2}$, ***** C_V из таблицы 4; $a = -C_V V_{\mu 1} V_{\mu 2} \frac{(T_2 - T_1)}{(V_{\mu 2} - V_{\mu 1})}$;
 $\beta = \frac{RT_1}{p_1 V_{\mu 1} + a V_{\mu 1}}$; $b = V_{\mu 1} (1 - \beta)$; $C_p - C_V = \frac{R}{1 - \frac{2a\beta^2}{RT_1 V_{\mu 1}}}$; $C_p = C_V + (C_p - C_V)$, где $V_{\mu 1}$ из упр. 1

Расширение через дроссель

Таблица 6

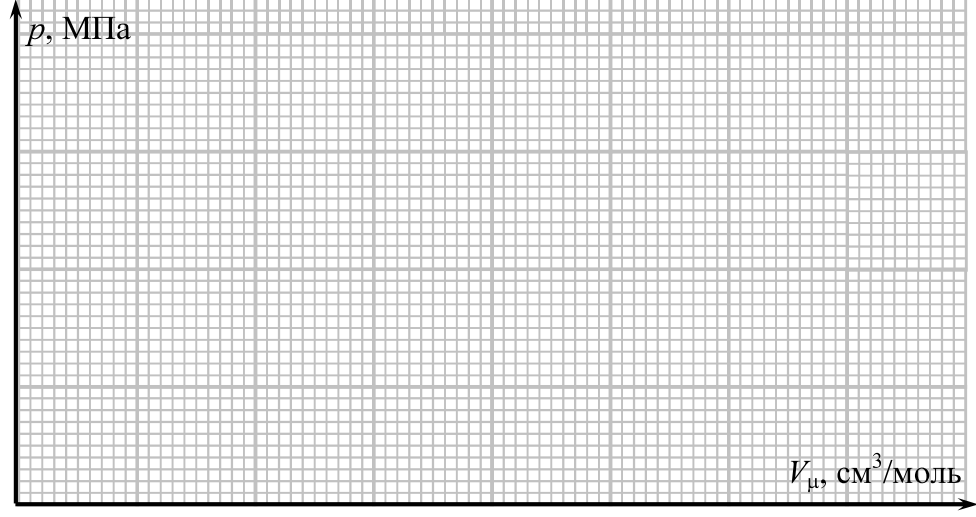
Шаг для изменения температуры: $\frac{1}{7}(T_{K2} - T_{K1}) = \dots$ К

T_1 , К	p_1 , МПа	Перенал давлений на дросселе, МПа	Длина правого отсека L_2 , см	* $V_{\mu 2}$, см ³ /моль	T_2 , К	p_2 , МПа	$\Delta T = T_2 - T_1$, К	$\frac{\Delta T}{p_2}$, К/МПа	T_1 доп., К	p_1 доп., МПа	β	b , см ³ /моль	a , Дж·см ³ /моль ²	C_p , Дж/(К·моль)	$C_p - C_V$, Дж/(К·моль)	C_V , Дж/(К·моль)

12

МодТ-07

Изотермы реального газа



Обозначения: $\dots - T_1 = T_{K1} = \dots$; $\dots - T_1 = T_{K2} = \dots$

Количество газа для ВСЕХ последующих экспериментов: _____ моль

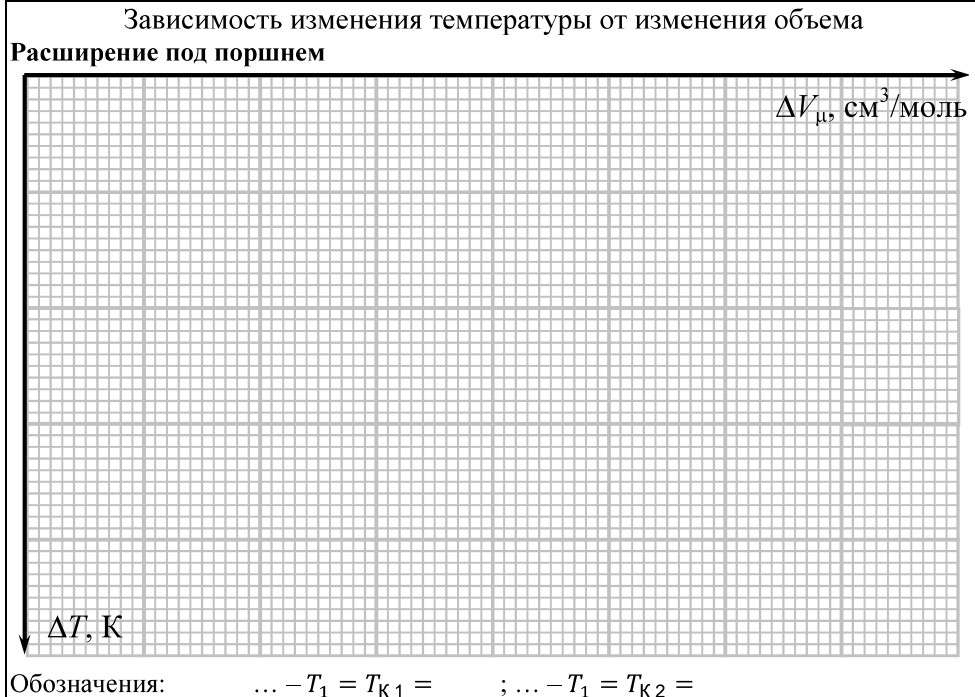
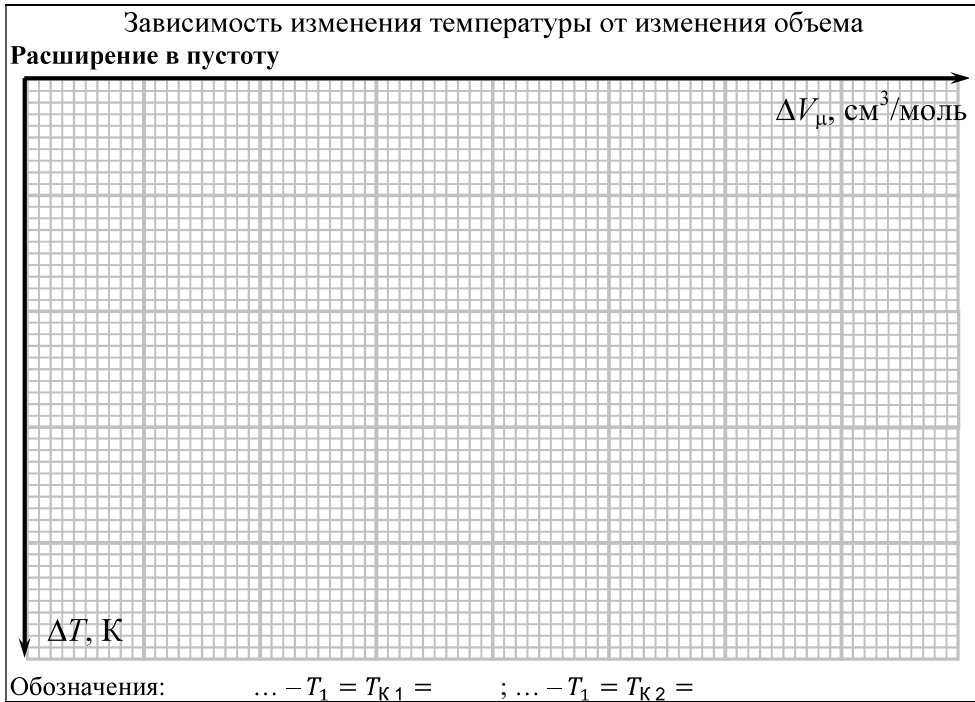
Упражнение 2. Адиабатное расширение газа (дифференциальный и интегральный эффект)

Расширение в пустоту

Таблица 2

Начальное состояние:		Температура $T_1 = T_{K1}$ (К):		Давление p_1 (МПа):				
Конечное состояние:								
Длина правого отсека L_2 , см	* Объем резервуара $V_{рез}$, см ³	** Молярный объем $V_{\mu 2}$, см ³ /моль	Температура T_2 , К	Давление p_2 , МПа	*** Изменение молярного объема $\Delta V_{\mu} = V_{\mu 2} - V_{\mu 1}$, см ³ /моль	Изменение температуры $\Delta T = T_2 - T_1$, К	Изменение давления $\Delta p = p_2 - p_1$, МПа	Коэффициент адиабатного расширения $\frac{\Delta T}{\Delta V_{\mu}}$, (К·моль)/см ³
0					0	0	0	—
5								
15								
25								
35								

* $V_{рез} = s(L_1 + L_2)$; ** $V_{\mu 2} = \frac{V_{рез}}{\nu}$; *** $V_{\mu 1}$ из упр. 1



Выводы. Наблюдается: для расширения в пустоту _____ эффект (т.к. зависимость ΔT от ΔV_{μ} _____), для расширения под поршнем _____ эффект (т.к. зависимость ΔT от ΔV_{μ} _____), для расширения через дроссель _____ эффект (т.к. зависимость ΔT от Δp _____)
