

РАБОТА ТД-05
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
АДИАБАТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА
ЧЕРЕЗ СУЖАЮЩЕЕСЯ СОПЛО

Цель работы – изучение закономерностей процесса течения воздуха через сужающееся сопло при различных перепадах давления, ознакомление с экспериментальными методами измерения основных параметров потока воздуха и критического отношения давлений.

Продолжительность работы – 4 ч.

Краткие теоретические сведения

В современной технике широко используется процесс стационарного течения воздуха и других газов в каналах различной формы. В термодинамике этот процесс рассматривают как локально равновесный, при котором каждая частица движущегося газа находится в термодинамическом равновесии и имеет вполне определенные значения параметров состояния (давление, температура, плотность и т. д.). При этом полагают, что движение газа является установившимся и одномерным, при котором параметры газа изменяются только вдоль одной координаты (по направлению движения).

Сужающееся сопло – частный случай проточной термодинамической системы, для которой уравнение первого начала термодинамики имеет вид

$$dh = dq - dl_{\text{техн}} - d\frac{w^2}{2} - d(gz) - dl_{\text{тр}} + dq_{\text{тр}}, \quad (5.1)$$

где dh – изменение энтальпии элементарного объема движущейся среды; dq – количество теплоты, подведенной извне через стенки канала или выделившейся в самом потоке (например, при наличии

химических реакций горения); $dl_{\text{техн}}$ – техническая работа; $d\frac{w^2}{2}$ – изменение кинетической энергии; $d(gz)$ – изменение потенциальной энергии в поле силы тяжести; $dl_{\text{тр}}$ – работа сил трения; $dq_{\text{тр}}$ – теплота трения.

Зависимость скорости потока от изменения энтальпии и температуры

При течении газа по каналам с неподвижными стенками техническая работа потока отсутствует: $dl_{\text{техн}} = 0$. Изменение потенциальной энергии пренебрежимо мало: $d(gz) = 0$. Количество теплоты dq , передаваемой через стенки канала, в большинстве случаев пренебрежимо мало по сравнению с изменением dh энтальпии элементарного объема движущейся среды, изменением кинетической $d(w^2/2)$ и потенциальной $d(gz)$ энергий, работой сил трения $dl_{\text{тр}}$ и теплотой трения $dq_{\text{тр}}$ (см. уравнение (5.1)). Если при этом нет внутреннего тепловыделения, то $dq = 0$ (адиабатическое течение). Тогда

$$dh = -d\frac{w^2}{2} - dl_{\text{тр}} + dq_{\text{тр}}. \quad (5.2)$$

В установившемся потоке вся работа сил трения преобразуется в энергию теплового движения частиц газа, т. е. в теплоту, так что

$$dl_{\text{тр}} = dq_{\text{тр}}. \quad (5.3)$$

Таким образом, термическое уравнение энергии адиабатического течения по каналу с неподвижными стенками имеет вид

$$dh = -d\frac{w^2}{2}. \quad (5.4)$$

Это уравнение справедливо как при отсутствии, так и при наличии сил трения.

Интегрирование уравнения (5.4) дает связь между скоростью и энтальпией в двух произвольных сечениях 1 и 2 потока:

$$w_2 = \sqrt{w_1^2 + 2(h_1 - h_2)}. \quad (5.5)$$

Если начальная скорость w_1 очень мала (площадь поперечного сечения 1 потока намного больше площади сечения 2 (истечение газа из сосуда большого объема), то скорость в произвольном сечении канала рассчитывается по формуле

$$w = \sqrt{2(h_1 - h_2)}. \quad (5.6)$$

В случае течения идеального газа $dh = C_{pm}dT$, и если пренебречь зависимостью теплоемкости от температуры, то скорость течения можно найти по изменению температуры:

$$w_2 = \sqrt{2C_{pm}(T_1 - T_2)}. \quad (5.7)$$

В реальных условиях часть работы сил давления вследствие внутреннего трения превращается в теплоту, т. е. процесс течения газа не является изэнтропийным (энтропия возрастает). На рис. 5.1 линией 1-2 изображен обратимый изэнтропийный процесс, а линией 1-2' – необратимый процесс течения газа (с трением) при одинаковом перепаде давления и увеличении энтропии от значения s_1 до значения s'_2 . Так как $(h_1 - h'_2) \ll (h_1 - h_2)$, то и скорость течения газа при наличии трения $w'_2 = \sqrt{2(h_1 - h'_2)} = \sqrt{2C_{pm}(T_1 - T'_2)}$ меньше теоретической: $w'_2 < w_2$. Для оценки потерь скорости вводят коэффициент скорости

$$\varphi = w'_2 / w_2 < 1, \quad (5.8)$$

значение которого определяют опытным путем. Уменьшение расхода газа, вызванное наличием трения, учитывают введением коэффициента расхода

$$\Psi = G_d / G_T, \quad (5.9)$$

где G_d – действительный расход; G_T – теоретический расход.

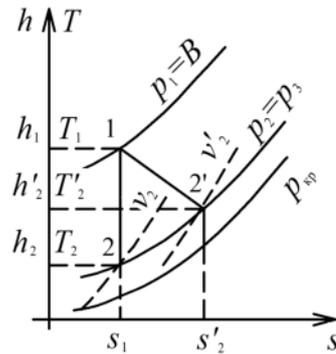


Рис. 5.1. Процесс течения газа в диаграмме $h-s$

Для различных сопел экспериментально полученные значения коэффициентов φ и Ψ лежат в диапазоне 0,93...0,98 и зависят от конструкции сопел и шероховатости внутренней поверхности.

Зависимость скорости потока от изменения давления

Согласно первому закону термодинамики

$$dh = dq_{\text{общ}} + dp/\rho, \quad (5.10)$$

где $dq_{\text{общ}} = dq + dq_{\text{тр}}$.

Объединив формулы (5.2) и (5.10) для адиабатического течения газа, уравнение первого закона термодинамики можно представить в механической форме:

$$d \frac{w^2}{2} = -\frac{dp}{\rho} - dl_{\text{тр}}. \quad (5.11)$$

Если пренебречь влиянием трения, то зависимость изменения скорости потока от изменения давления по направлению течения газа выразится как

$$d \frac{w^2}{2} = wdw = -\frac{dp}{\rho}. \quad (5.12)$$

Адиабатическое течение идеального газа без трения является изэнтропийным процессом, в котором зависимость плотности от давления выражается так:

$$\rho = \rho_1 \left(\frac{p}{p_1} \right)^{1/k}, \quad (5.13)$$

где $k = C_p/C_v$ – показатель адиабаты.

В результате интегрирования уравнения (5.12) с учетом (5.13) устанавливается связь между скоростью и давлением в двух произвольных сечениях 1 и 2 потока:

$$w_2 = \sqrt{w_1^2 + 2 \frac{k-1}{k} \frac{p_1}{\rho_1} \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right)}, \quad (5.14)$$

где $\beta = p_2/p_1 = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^k$, а w_1, p_1, ρ_1 и w_2, p_2, ρ_2 – соответственно скорость, давление и плотность газа в сечениях 1 и 2 потока.

Если $w_1 \cong 0$, то скорость газа в произвольном сечении канала выражается через отношение давлений:

$$w_2 = \sqrt{2 \frac{k-1}{k} \frac{p_1}{\rho_1} \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right)}. \quad (5.15)$$

Зависимость скорости потока от площади поперечного сечения канала сопла

Изменение площади поперечного сечения канала влияет на изменение скорости потока по-разному, в зависимости от фактической скорости газа в данном сечении.

Скорость потока связана с площадью поперечного сечения канала и плотностью газа уравнением расхода:

$$G = \rho w f = \text{const}, \quad (5.16)$$

где G – секундный расход газа (не изменяется по длине канала), кг/с; ρ – плотность, кг/м³; f – площадь поперечного сечения канала, м².

После дифференцирования уравнения (5.16) получим

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dw}{w} + \frac{df}{f} = 0. \quad (5.17)$$

Результатом совместного решения уравнений (5.12) и (5.17) для изоэнтропийного потока является соотношение между изменением скорости потока и изменением площади сечения канала:

$$\frac{dw}{w} = \frac{-df/f}{1 - (w/a)^2} = \frac{-df/f}{1 - M^2}, \quad (5.18)$$

где $a = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s = \sqrt{kRT}$ – скорость распространения звука в газе; $M = w/a$ – число Маха.

Из соотношения (5.18), в частности, следует, что ускорение дозвукового потока может быть осуществлено только в сужающемся канале ($dw > 0$ при $df < 0$). Скорость потока достигает максималь-

ного значения в выходном (самом узком) сечении сопла. При определенном значении перепада давления газа в выходном и входном сечениях сопла скорость потока в самом узком сечении сопла может достичь скорости звука. Такой режим течения газа в сопле называют критическим, а параметры потока в выходном сечении сопла – критическими параметрами.

В конкретных задачах, связанных с течением газа, известными параметрами являются давление p_1 перед соплом и давление p_3 за соплом. Уменьшение давления p_3 при неизменном давлении p_1 приводит к перераспределению давления вдоль сопла, при этом в выходном сечении устанавливается давление p_2 . Оно равно давлению p_3 до тех пор, пока скорость потока газа в выходном сечении сопла не станет равна скорости звука в этом же сечении (местной скорости звука). Дальнейшее уменьшение давления p_3 уже не будет сказываться на перераспределении давления в сопле, так как изменения давления p_3 , происходящие со скоростью звука, не могут проникнуть внутрь сопла. Таким образом, давление газа в выходном сечении сопла остается неизменным, равным критическому ($p_2 = p_{кр}$). Отношение давлений $\beta_{кр} = p_{кр}/p_1$, при котором устанавливается критический режим течения газа, называют критическим. Его значение зависит только от свойств газа и вычисляется по формуле $\beta_{кр} = (2/(k+1))^{k/(k-1)}$. Для воздуха $k = 1,41$ и $\beta_{кр} = 0,528$.

Зависимости скорости течения из сужающегося сопла и расхода газа от $\beta = p_3/p_1$ представлены на рис. 5.2.

Таким образом, можно выделить три режима течения газа в сужающемся сопле:

1) докритический режим (линии $b - 1$ и $m - 1$) –

$$\beta > \beta_{кр},$$

при котором

$$p_2 = p_3; \quad w < a; \quad M = w/a < 1;$$

2) критический режим (точки m и b) –

$$\beta = \beta_{кр},$$

при котором

$$p_2 = p_3 = p_{кр}; \quad w = a; \quad M = 1;$$

3) сверхкритический режим (линии $c - b$ и $n - m$) –

$$\beta < \beta_{кр},$$

при котором

$$p_3 < p_{кр}; \quad w = a; \quad M = 1.$$

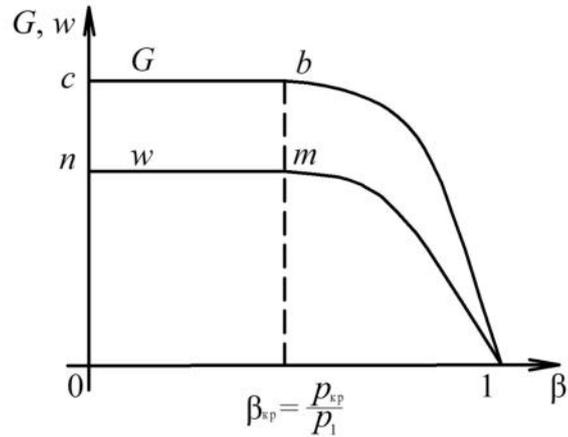


Рис. 5.2. Зависимости расхода газа и скорости потока от перепада давления

Непрерывное ускорение потока до сверхзвуковых скоростей может быть осуществлено в сопле Лавалья, состоящем из участка сужения канала (где происходит ускорение дозвукового потока) и следующего за ним расширяющегося канала, на котором ускоряется сверхзвуковой поток. В узком сечении сопла Лавалья скорость потока равна местной скорости звука.

Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 5.3.

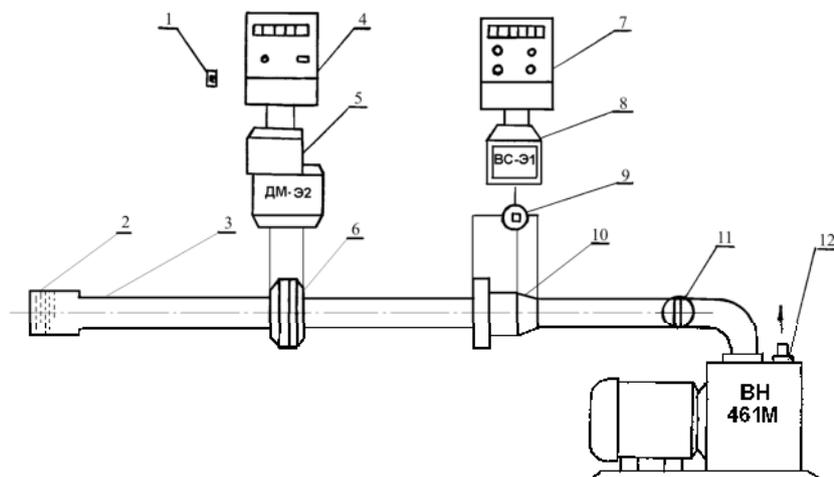


Рис. 5.3. Схема экспериментальной установки:

1 – тумблер электропитания; 2 – сетчатый фильтр; 3 – трубка из коррозионно-стойкой стали с рабочим элементом; 4 – блок контроля расхода; 5 – дифференциальный манометр ДМ-Э2; 6 – нестандартная расходная диафрагма; 7 – блок контроля давления; 8 – мановакуумметр; 9 – кран КП-6; 10 – сужающееся сопло; 11 – вентиль; 12 – вакуумный насос

Установка включает: рабочий участок с сужающимся соплом, диаметр минимального сечения $d_{кр} = 1,68$ мм; вакуумный насос ВН 461М; приборы и блоки измерения, контроля и управления. Рабочий участок представляет собой трубку 3 из коррозионно-стойкой стали с рабочим элементом – сужающимся соплом 10.

Воздух из помещения поступает через сетчатый фильтр 2 и нестандартную расходную диафрагму 6 диаметром 3 мм к сужающемуся соплу 10. Перепад давления создается вакуумным насосом 12. Изменение перепада давления и, следовательно, регулирование расхода воздуха, проходящего через сопло, осуществляются изменением проходного сечения вентиля 11. Перепад давления на расходной диафрагме 6 измеряется дифференциальным манометром ДМ-Э2 5 и преобразуется в электрический сигнал, который через усилитель УП-20 поступает на блок контроля расхода 4 (миллиамперметр М17 30 А). Усилитель УП-20 и блок контроля расхода смонтированы в одном корпусе.

Для измерения давления газа перед соплом в минимальном сечении и за соплом имеются отверстия диаметром 0,5 мм. Измере-

ние проводится с помощью отводов (импульсных трубок), подсоединенных через кран 9 КП-6 к блоку контроля давления 7 и мановакуумметру 8.

Приборы, используемые при выполнении лабораторной работы, имеют класс точности 1,0.

Порядок проведения эксперимента

Экспериментальное исследование включает измерение действительного расхода воздуха G_d при различных значениях отношения давлений $\beta = p_3 / p_1$, начиная с $\beta = 1$ и кончая наименьшим значением, достигаемым в эксперименте. Все показания приборов необходимо записывать в журнал наблюдений и соблюдать порядок проведения эксперимента.

1. Перед началом работы измерить температуру T_1 и давление p_1 на входе в сопло. Давление можно принять равным барометрическому ($p_1 = B$), так как скорость газа и потери на трение перед соплом очень малы.

Измерения проводятся с помощью лабораторных барометра и термометра.

2. При полностью закрытом вентиле 11 (см. рис. 5.3) включить: электрическое питание тумблером электропитания 1 – кнопкой «Сеть», вакуумный насос 12 – кнопкой «Обдув» на блоке контроля расхода 4; мановакуумметр 8 – кнопкой «Вкл.». При этом загорятся лампочки индикации, указывающие на их включение.

В этом случае перепад давления в сопле отсутствует, т. е. $\beta = 1$ ($p_1 = p_2 = p_3 = B$), и, следовательно, расход воздуха равен нулю: $G_d = 0$.

3. Плавно открыть вентиль 11 и установить на блоке контроля давления 7 значение перепада давления за соплом $\Delta p_3 = 0,1$ атм (Δp_3 – показание мановакуумметра, равное разности барометрического и абсолютного давлений, $\Delta p_3 = B - p_3$)*.

Убедиться в стационарности режима, что характеризуется постоянством давления Δp_3 во времени.

* Измерение перепада давления в атмосферах связано с тем, что измерительные приборы экспериментальной установки градуированы в атмосферах.

Используя кран 9, измерить с помощью мановакуумметра 8 перепад давления Δp_2 в выходном сечении сопла, равное разности барометрического давления B и абсолютного давления p_2 .

По показаниям блока контроля расхода 4 измерить объемный расход воздуха в условных единицах шкалы L , мм.

4. Последовательно выполнить измерения на других режимах, при этом на каждом последующем режиме перепад давления Δp_3 за соплом увеличивать его вентилем 11 на 0,1 атм по шкале контроля давления. Последний режим провести при полностью открытом вентиле 11.

5. Результаты измерений записать в журнал наблюдений.

6. Выключить установку, отключив мановакуумметр 8, блок контроля расхода 4, электропитание тумблером 1 и приступить к обработке полученных результатов.

Обработка результатов эксперимента

1. Для каждого режима перевести показания мановакуумметра Δp_i из системы МКС (атм) в систему СИ (Па):

$$\Delta p'_2 = \Delta p_2 \cdot 0,981 \cdot 10^5;$$

$$\Delta p'_3 = \Delta p_3 \cdot 0,981 \cdot 10^5.$$

2. Найти значения абсолютных давлений, Па:

$$p_2 = p_1 - \Delta p'_2;$$

$$p_3 = p_1 - \Delta p'_3.$$

3. Рассчитать отношение давлений:

$$\beta = p_3 / p_1.$$

4. Используя график градуировки блока контроля расхода 4 (см. рис. 5.4), найти действительный объемный расход воздуха $V'_д$, м³/ч, и вычислить по формуле $V_д = V'_д / 3600$ м³/с.

5. Рассчитать действительный массовый расход воздуха, кг/с:

$$G_д = \frac{V_д p_1}{R T_1}, \quad (5.19)$$

где $R = 287$ Дж/(кг · К) – газовая постоянная воздуха.

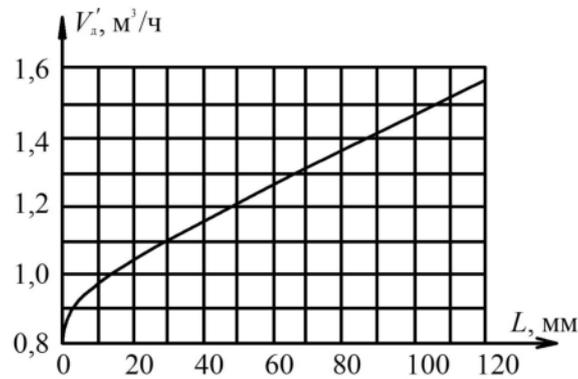


Рис. 5.4. График градуировки блока контроля расхода

6. Найти относительный действительный расход воздуха:

$$\bar{G}_d = \frac{G_d}{G_{d\max}}, \quad (5.20)$$

где $G_{d\max}$ — экспериментально определенный максимальный действительный расход воздуха.

7. Построить график зависимости относительного расхода воздуха \bar{G}_d от отношения давлений β .

8. Задать два расчетных режима течения газа: $\beta > \beta_{кр}$ — докритический и $\beta < \beta_{кр}$ — сверхкритический.

9. Теоретическое значение температуры воздуха на выходе из сопла T_2 найти по формуле для адиабатного процесса:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (5.21)$$

Рассчитать теоретическую скорость течения воздуха w_2 , используя формулу (5.7) и принимая теплоемкость воздуха $C_{pm} = 1006 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Определить теоретический удельный объем воздуха на выходе из сопла v_2 :

$$v_2 = RT_2 / p_2. \quad (5.22)$$

10. Для выбранного докритического режима течения газа ($\beta > \beta_{кр}$) вычислить теоретический расход воздуха, кг/с:

$$G_T = \frac{f_2 w_2}{v_2}, \quad (5.23)$$

где $f_2 = f_{кр} = 0,25\pi d_{кр}^2$ – площадь минимального сечения сопла, м²; w_2 – теоретическая скорость течения газа на выходе из сопла, м/с; v_2 – удельный объем воздуха в выходном сечении сопла, м³/кг.

11. Найти для выбранного докритического режима течения газа ($\beta > \beta_{кр}$) коэффициент расхода сопла

$$\Psi = G_d / G_T. \quad (5.24)$$

12. Определить действительную скорость течения воздуха. Точки 2 и 2' находятся на одной и той же изобаре p_2 (см. рис. 5.1), но точное положение точки 2' не известно, поэтому действительную скорость истечения w'_2 рассчитывают методом последовательных приближений с помощью следующих формул:

$$w'_2 = 44,85 \sqrt{(T_1 - T'_2)}; \quad (5.25)$$

$$w'_2 = \frac{G_d v'_2}{f_{кр}}, \quad (5.26)$$

где G_d – действительный (по результатам измерений) расход воздуха, кг/с; $f_{кр}$ – площадь минимального сечения сужающегося сопла, м²; v'_2 – действительный удельный объем воздуха на выходе из сопла при течении с трением, м³/кг, его рассчитывают по действительной температуре воздуха на выходе из сопла T'_2 , К:

$$v'_2 = RT'_2 / p_2. \quad (5.27)$$

Так как значение температуры T'_2 не известно, то в первом приближении задаются значением T'_2 на 2...3 К выше значения температуры T_2 , найденного в п. 9.

Значения скорости течения газа w'_2 , рассчитанные по формулам (5.25) и (5.26), должны быть одинаковыми. Если полученные таким способом значения скорости не равны, то задаются значения температуры T_2'' во втором приближении (на 2...3 К выше или ниже значения T_2' течения газа) и так до тех пор, пока не будут получены одинаковые значения скорости w_2'' по формулам (5.25) и (5.26).

13. Определить коэффициент скорости $\varphi = w_2'' / w_2$.

14. Найти коэффициент расхода Ψ и коэффициент скорости φ (для сверхкритического режима, $\beta < \beta_{кр}$).

15. Рассчитать теоретический расход воздуха. При этом необходимо помнить, что при сверхкритическом режиме течения газа ($\beta < \beta_{кр}$) давление воздуха на выходе из сужающегося сопла всегда равно критическому: $p_2 = p_{кр} = \beta_{кр} p_1$.

Теоретический расход воздуха (кг/с) определяют по формуле

$$G_{т.кр} = \frac{f_{кр} w_{кр}}{v_{кр}},$$

где $w_{кр}$ – скорость течения воздуха из сопла при критическом режиме $\beta = \beta_{кр}$, ее рассчитывают по формуле (5.5):

$$w_{кр} = 44,85 \sqrt{T_1 - T_{кр}}.$$

Теоретическое значение температуры в минимальном сечении сопла вычисляют по формуле

$$T_{кр} = T_1 \beta_{кр}^{\frac{k-1}{k}} = 0,528^{0,286} T_1 = 0,83 T_1.$$

Удельный объем воздуха в минимальном сечении сопла определяют из уравнения состояния идеального газа:

$$v_{кр} = \frac{R T_{кр}}{p_{кр}},$$

где $p_{кр} = 0,528 p_1$.

Расчет действительной скорости течения воздуха из сопла ведут так же, как в п. 12:

$$w'_{кр} = 44,85 \sqrt{T_1 - T'_{кр}};$$

$$w'_{кр} = \frac{G_d v'_{кр}}{f_{кр}}.$$

16. Определить коэффициент расхода сопла для сверхкритического режима течения по формуле

$$\Psi = G_d / G_{т.кр}.$$

17. Вычислить коэффициент скорости сопла для сверхкритического режима по формуле

$$\varphi = w''_{кр} / w'_{кр}.$$

Контрольные вопросы

1. Какое течение называется установившимся?
2. Что называется соплом?
3. Почему течение газа из сопла можно считать адиабатическим?
4. Чем создается перепад давления в экспериментальной установке?
5. Что такое отношение давлений β и от чего оно зависит?
6. Что такое критическое отношение давлений $\beta_{кр}$ и от чего оно зависит?
7. Как изменяются скорость и расход газа при уменьшении давления газа на выходе из сужающегося сопла (при $\beta < \beta_{кр}$ и $\beta > \beta_{кр}$)?
8. Как находится действительная скорость течения?
9. Как рассчитывается действительная температура воздуха на выходе из сопла?
10. Что такое φ и Ψ и от чего они зависят?