

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ИСТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ
СУЖИВАЮЩЕЕСЯ СОПЛО**

◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

Министерство образования Российской Федерации
Тамбовский государственный технический университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ИСТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ
СУЖИВАЮЩЕЕСЯ СОПЛО**

Методические указания к лабораторной работе
для студентов второго курса специальности 101600

Тамбов
◆ Издательство ТГТУ ◆
2004

УДК 621.1.016(076)
ББК 311я73-5
И88

Утверждено Редакционно-издательским советом университета

Р е ц е н з е н т

Кандидат технических наук, доцент ТГТУ
В.И. Барсуков

И88 Исследование процесса истечения воздуха через суживающееся сопло: Метод. указания / Сост.: В.И. Ляшков, В.А. Русин. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. тех. ун-та, 2004. 12 с.

Приводятся методические указания и порядок выполнения лабораторной работы, включая подробное описание экспериментальной установки, методики проведения опытов и обработки данных. Дается список рекомендуемой литературы.

Предназначаются для студентов второго курса, обучающихся по специальности 101600.

УДК 621.1.016(076)
ББК 311я73-5

© Тамбовский государственный
технический университет (ТГТУ), 2004

Учебное издание

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ СУЖИВАЮЩЕЕСЯ СОПЛО

Методические указания

С о с т а в и т е л и:

ЛЯШКОВ Василий Игнатьевич
РУСИН Владимир Александрович

Редактор Т. М. Федченко
Инженер по компьютерному макетированию М. Н. Рыжкова

Подписано к печати 20.02.2004
Формат 60 × 84 / 16. Бумага газетная. Печать офсетная
Гарнитура Times New Roman. Объем: 0,70 усл. печ. л.; 0,68 уч.-изд. л.
Тираж 200 экз. С. 138

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

Лабораторная работа

Т е м а: "ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ СУЖИВАЮЩЕЕСЯ СОПЛО"

Цель работы: экспериментальное изучение процесса адиабатного истечения воздуха через суживающееся сопло. Опытным путем определить зависимость скорости и расхода газа через суживающееся сопло и коэффициента истечения через него от величины перепада давлений на входе и выходе из сопла, характеризуемой отношением давлений p_2/p_1 .

Общие теоретические сведения

Процессы течения газов по каналам осуществляются во многих машинах и аппаратах, поэтому изучение этих процессов и связанных с ними преобразований энергии в движущемся потоке газа имеет важное практическое значение. Основной задачей термодинамического анализа применительно к газовому потоку является определение скорости истечения, секундного расхода газа, а также установление условий, существенно влияющих на процесс истечения и его эффективность.

При проведении исследований считаем, что течение газового потока установившееся и изоэнтропное.

При адиабатном установившемся течении газа увеличение кинетической энергии происходит за счет уменьшения его энтальпии, а следовательно, и внутренней энергии. Увеличение скорости газа происходит при уменьшении его давления и температуры, а следовательно, и при уменьшении местной скорости звука. Теоретически расход газа M_T через сопло определится по выражению [1]

$$M_T = f \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 \rho_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (1)$$

где f – площадь выходного сечения сопла, m^2 ; k – показатель адиабаты для вытекающего газа; ρ_1 – плотность газа на входе в сопло, kg/m^3 , $\rho_1 = 1/v_1$; v_1 – удельный объем газа на входе в сопло, m^3/kg ; p_1 и p_2 – абсолютные давления перед соплом и после него, Па.

Выражение, находящееся под знаком корня, представляет собой удельный ток газа через сопло M_{T1} – так называют массовый расход газа через единицу выходной площади, $kg/(m^2 \cdot c)$. В соответствии с законом сохранения массы, при установившемся течении величина массового расхода в любом i -м сечении сопла одна и та же: $M_i = M_T = M_{T1} f_i = const$.

Теоретическая скорость истечения из сопла для случая адиабатного истечения идеального газа при $w_1 = 0$, как известно, определяется формулой [1]

$$w_T = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (2)$$

Для водяного пара ее определяют через располагаемый теплоперепад $w_T = \sqrt{2(h_1 - h_2)}$, где h_1 и h_2 – энтальпии пара на входе в сопло и выходе из него. Конечно же эта формула применима и для расчета скорости истечения газа, следует лишь рассчитать предварительно значения h_1 и h_2 .

Если по формулам (1) и (2) рассчитать зависимость M_{T1} и w_T от перепада давлений $p_1 - p_2$, величину которого удобно характеризовать отношением давлений p_2/p_1 , то получим известные графики, приведенные на рисунках 1 и 2. Еще раз подчеркнем, что это чисто теоретические зависимости, поскольку по мере увеличения перепада давлений (уменьшения отношения p_2/p_1) скорость газа w увеличивается, достигает скорости звука a , и течение становится критическим. При этом дальнейшее повышение перепада давлений уже не приводит к дальнейшему увеличению скорости газа на выходе из сопла.

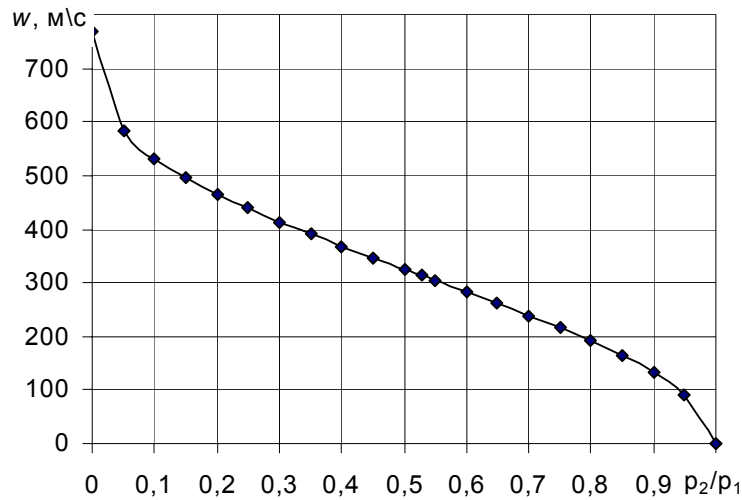


Рис. 1 Теоретическая зависимость $w_T = f(p_2 / p_1)$ для воздуха при $T_1 = 293$ К

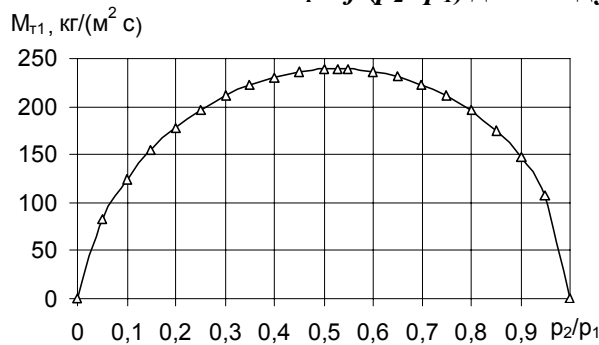


Рис. 2 Теоретическая зависимость $M_{T1} = f(p_2 / p_1)$ для воздуха при $T_1 = 293$ К и $p_1 = 0,1013$ МПа

Преодолеть кризис течения и получить сверхзвуковые скорости газа, как известно, можно только с помощью сопла Лавала, которое состоит из суживающейся части (конфузор), где скорость w может достичь скорости звука a , и расширяющейся части (диффузор), где происходит дальнейший разгон газа до сверхзвуковой скорости $w > a$.

Известно, что критическое отношение давлений $\beta_{кр}$, при котором скорость w достигает скорости звука a , зависит от свойств газа и определяется соотношением

$$\beta_{кр} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{кр} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}},$$

где $\kappa = c_{pm} / c_{vm}$ – показатель адиабаты для данного газа. Для воздуха $\kappa = 1,4$ и $\beta_{кр} = 0,528$.

При критическом течении газа его теоретический расход M_T и теоретическую скорость w_T можно рассчитывать по тем же формулам (1) и (2), подставляя в них вместо отношения p_2 / p_1 значение $\beta_{кр}$. Ряд несложных преобразований в этом случае позволяет несколько упростить названные формулы:

$$M_T^{кр} = f \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa + 1}} p_1 \rho_1 \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{2}{\kappa - 1}}$$

и
$$w_T^{кр} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa + 1}} R T_{кр} .$$

Для двухатомных газов (воздуха, например) $\kappa = 1,4$ и приведенные формулы можно записать так

$$M_T^{кр} = 0,686 f \sqrt{p_1 \rho_1} \tag{3}$$

и

$$w_T^{кр} = 1,08 \sqrt{R T_1} . \tag{4}$$

На рисунках 3 и 4 приведены расчетные результаты для тех же условий, полученные с учетом возникновения кризиса течения. На рис. 3 показано также, как уменьшается скорость звука a в зависимости от отношения давлений p_2 / p_1 . Следует конечно же заметить, что эти расчетные зависимости получены для равновесных адиабатных процессов, т.е. без учета потерь энергии газа на преодоление внутреннего трения в системе.

В действительности процессы истечения через сопла и отверстия всегда неравновесные, необратимые. Они сопровождаются потерями работоспособности и увеличением энтропии и энтальпии газа и поэтому и скорость w , и расход газа всегда несколько ниже, чем теоретические $w_d < w_t$, $M_{d1} < M_{t1}$. В расчетах это учитывают введением соответствующих коэффициентов

- коэффициент скорости $\varphi = w_d / w_t$;
- коэффициент истечения $\mu = M_{d1} / M_{t1}$.

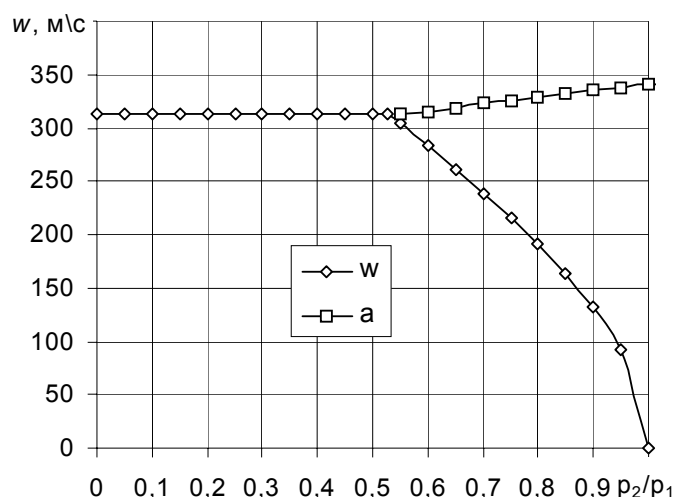


Рис. 3 Расчетная зависимость скорости истечения w и скорости звука a от отношения давлений p_2 / p_1 для воздуха при $T_1 = 293$ К и $p_1 = 0,1013$ МПа

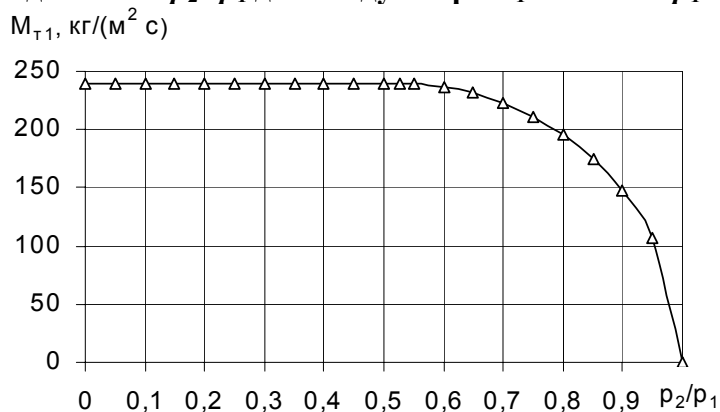


Рис. 4 Расчетная зависимость $M_{T1} = f(p_2 / p_1)$ для воздуха при $T_1 = 293$ К и $p_1 = 0,1013$ МПа

Значения этих коэффициентов находится опытным путем, и в этом состоит одна из целей нашей работы. Обычно с увеличением скорости w_d величины коэффициентов увеличиваются, а их численные значения существенно зависят от ряда факторов, в том числе, от качества обработки поверхности канала, его формы и геометрических размеров.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Устройство экспериментальной установки изображено на рис. 5. При включении вакуумного насоса 10, в качестве которого используется хладоновый мотор-компрессор от бытового холодильника, воздух

откачивается из ресивера 9, сглаживающего циклические колебания давления при работе насоса. Наружный воздух, засасываемый в ресивер, проходит предварительно через измерительные приборы (ротаметр 1, газовый счетчик 2 и мерную шайбу 3, подключенную к спиртовому микроманометру 13), и перетекает через суживающееся сопло 6 с выходным диаметром 0,75 мм в ресивер 9. Вакуум перед соплом и после него измеряется техническими вакуумметрами 5 и 7 с трубкой Брандона в качестве чувствительного элемента. Вентильми 4 и 8 можно изменять степень разряжения на входе и выходе исследуемого сопла, произвольно устанавливая различные перепады давления $p_1 - p_2$ и, соответственно, разные отношения p_2/p_1 .

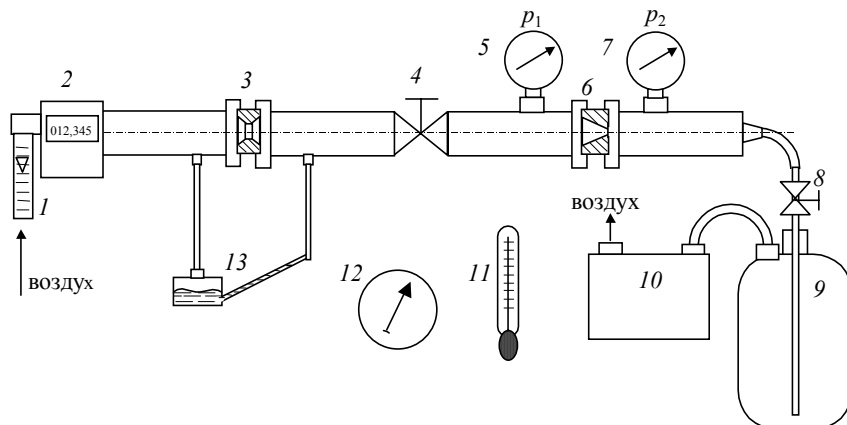


Рис. 5 Схема экспериментальной установки:

- 1 – ротаметр; 2 – счетчик газовый; 3 – шайба мерная;
 4, 8 – вентили регулировочные; 5, 7 – вакуумметры; 6 – сопло;
 9 – ресивер; 10 – вакуум-насос (мотор-компрессор хладоновый);
 11 – термометр; 12 – барометр; 13 – микроманометр

Перед началом экспериментов следует проверить, а при необходимости и поправить, «установку нуля» на микроманометре, убедившись, что спиртовые столбики в обоих капиллярах микроманометра располагаются против нулевого деления шкалы.

Экспериментальное исследование выполняется в две стадии. Сначала исследуют влияние изменения давления p_2 на расход газа при постоянстве давления p_1 . Для этого перекрывают вентилем 8 выход из ресивера, включают вакуум-насос и откачивают воздух из ресивера в течение 3...5 минут. После этого полностью открывают вентиль 8, выжидают 2...3 минуты для наступления установившегося режима (показания вакуумметра 7 перестанут изменяться), и записывают в таблицу исходных опытных данных показания вакуумметров, ротаметра и микроманометра. Записывают показания газового счетчика, одновременно включая секундомер, и фиксируют продолжительность работы установки, пока через счетчик не пройдет ровно 10 литров воздуха. Продолжительность опыта тоже заносят в таблицу.

Далее, прикрывая вентиль 8, уменьшают проходное сечение для воздуха, тем самым уменьшая его расход. В результате вакуум за соплом станет меньше ($p_{2\text{вак}} \approx 0,6 \text{ кг/см}^2$). Когда режим работы установится, записывают показания всех приборов и продолжительность перетекания 10 литров воздуха. Вентилем 8 еще раз уменьшают вакуум за соплом ($p_{2\text{вак}} \approx 0,5 \text{ кг/см}^2$) и проводят измерения. Аналогично проводят замеры при $p_{2\text{вак}} \approx 0,4 \text{ кг/см}^2$, $p_{2\text{вак}} \approx 0,3 \text{ кг/см}^2$, $p_{2\text{вак}} \approx 0,2 \text{ кг/см}^2$ и $p_{2\text{вак}} \approx 0,1 \text{ кг/см}^2$.

Другая серия опытов позволяет исследовать влияние изменения давления p_1 на расход воздуха. Для этого вновь полностью открывают вентиль 8, после чего прикрывают вентиль 4 так, чтобы вакуумметр 5 показывал разряжение $p_{1\text{вак}} \approx 0,2 \text{ кг/см}^2$. Дождавшись установившегося режима, опять записывают показания всех приборов и продолжительность перетекания 10 литров воздуха через газовый счетчик. Далее проводятся аналогичные опыты при $p_{1\text{вак}} \approx 0,3 \text{ кг/см}^2$, $p_{1\text{вак}} \approx 0,4 \text{ кг/см}^2$ и $p_{1\text{вак}} \approx 0,5 \text{ кг/см}^2$.

По показаниям барометра и термометра фиксируем барометрическое давление и температуру в помещении.

ТАБЛИЦА ИСХОДНЫХ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ*

№№ п/п	$p_{1\text{вак}},$ кг/см ²	$p_{2\text{вак}},$ кг/см ²	$Z_{1\text{сч}}$	$Z_{2\text{сч}}$	$N_{\text{МК}},$ мм	$n_{\text{рот}},$ дел	$\tau, \text{с}$
1	0	0,56	1,614	1,624	214	96	131
2							
3							

* В качестве примера в таблице приведен один из результатов калибровочного опыта: барометрическое давление $B_k = 754$ мм рт. ст. и температура $t_{1k} = 18,9$ °С. Параметры воздуха в помещении (для всех опытов): барометрическое давление $B = \underline{\hspace{2cm}}$ мм рт. ст., температура $t_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ °С.

Обработка опытных данных

По результатам измерений для каждого из опытов находим:

1 Объемный расход при действительных параметрах воздуха B и t_1 в помещении

$$G = (Z_{\text{сч}2} - Z_{\text{сч}1}) / \tau = 0,01 / \tau, \text{ м}^3/\text{с}.$$

2 Объемный расход, определенный по калибровочному графику микроанометра $G_{\text{МКМ}}$ и объемный расход по калибровочному графику ротаметра $G_{\text{рот}}$. Сопоставляем эти величины, делая заключение об их сравнительной точности.

3 Объемный расход, пересчитанный на параметры воздуха в помещении, отличающиеся от условий калибровки. Для этого запишем основное уравнение газовых состояний для условий калибровки и условий проведения наших опытов

$$\frac{B_k G_k}{T_k} = \frac{B G_{\text{МКМ}}}{T},$$

откуда находим

$$G_k = \frac{B G_{\text{МКМ}} T_k}{T B_k},$$

где G_k – объемный расход воздуха через сопло, отнесенный к параметрам его, зафиксированным при калибровке мерной шайбы, м³/с; B и B_k – барометрическое давление во время опытов и во время калибровки, мм рт. ст.; T и T_k – абсолютная температура воздуха во время опытов и во время калибровки, К.

4 Действительный массовый расход воздуха через сопло определяем из уравнения Клапейрона $BG = MRT$, откуда

$$M_d = \frac{BG}{RT}$$

или, по пересчитанному на условия калибровки расходу,

$$M_d = \frac{B_k G_k}{R T_k},$$

где $R = 287$ Дж/(кг · К) – газовая постоянная сухого воздуха [2].

5 Находим абсолютные давления p_1 и p_2 , их отношение p_2 / p_1 и делаем заключение о характере течения (докритическое или критическое).

6 По формулам (1) или (3) рассчитываем теоретический расход воздуха через сопло, учитывая, что выходной диаметр сопла $d_2 = 0,75$ мм и выходное сечение сопла будет определяться по формуле

$$f_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}.$$

7 Рассчитываем коэффициент истечения μ

$$\mu = M_d / M_T.$$

8 По формулам (2) или (4) рассчитываем теоретическую скорость истечения воздуха из сопла.

9 По действительному расходу газа M_d рассчитываем действительную скорость истечения

$$w_{2д} = \frac{M_d v_{2д}}{f}, \quad (5)$$

где $v_{2д}$ – удельный объем воздуха в выходном сечении сопла, определяемый давлением p_2 и температурой $T_{2д}$ газа в нем

$$v_{2д} = \frac{RT_{2д}}{p_2}. \quad (6)$$

Подчеркнем, что при критическом течении $p_2 = p_1 \beta_{кр}$.

При отсутствии трения удельный объем v_2 и температура T_2 на выходе из сопла легко рассчитываются по известным соотношениям:

$$v_2 = v_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/k} = \frac{RT_1}{p_1} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/k}$$

и

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k}. \quad (7)$$

Ту же действительную скорость $w_{2д}$ можно рассчитать и по другой формуле

$$w_{2д} = \sqrt{2(h_1 - h_2)} = \sqrt{2c_p(T_1 - T_{2д})}, \quad (8)$$

где c_p – средняя удельная теплоемкость воздуха при температуре 20...30 °С. С высокой степенью точности $c_p = 1003$ Дж/(кг · К) [2].

Формулы (5) и (8) представляют собою систему из двух уравнений с двумя неизвестными $w_{2д}$ и $T_{2д}$, решать которую удобно методом последовательных приближений, задавая в качестве первого приближения значение $T_{2д}$ на 2...2,5 К больше, чем величина T_2 , рассчитанная по формуле (7)

$$T_{2д} = T_2 + 2,5.$$

С такой температурой по формулам (5) и (8), с учетом выражения (6), рассчитывают значения $w_{2д}$, целенаправленно подбирая величину $T_{2д}$ так, чтобы получаемые значения $w_{2д}$ совпадали с точностью до 2...3 %. Тогда задача считается решенной.

10 Рассчитываем коэффициент скорости

$$\varphi = w_d / w_T.$$

11 Результаты расчетов для каждого из режимов заносятся в сводную таблицу, по ней строятся графики

$$\mu = f(p_2 / p_1) \text{ и } \varphi = f(p_2 / p_1).$$

*Сводная таблица результатов расчета**

№	p_1 , МПа	p_2 , МПа	$\frac{p_2}{p_1}$	G , м ³ /с·10 ⁵	M_T , кг/с·10 ⁵	w_T , м/с	M_d , кг/с·10 ⁵	$w_{2д}$, м/с	μ , 1/1	φ , 1/1
1	0,1003	0,0454	0,45 1	7,63	10,4	314	9,06	304	0,86 6	0,96 9
2										
3										

* Для примера приведены результаты обработки одного из режимов.

12 Проводится оценка максимальных погрешностей определения коэффициентов μ и φ (как результатов косвенных измерений) для одного из режимов истечения по методике, изложенной в [3].

13 Работа заканчивается анализом полученных зависимостей и формулированием выводов и рекомендаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Ляшков В.И. Теоретические основы теплотехники. М., 2002. 253 с.
- 2 Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. М., 1969. 375 с.
- 3 Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче / Под ред. В.И. Крутова и Е.В. Шишова. М., 1988. 216 с.