




ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Теплоэнергетика и прикладная гидромеханика»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ к курсовой работе

«Расчет истечения газов из сверхзвукового сопла»



Ростов-на-Дону, 2013



Аннотация

В компактной форме приводится расчет истечения газов и сверхзвукового сопла.

Курсовая работа предназначена для студентов 2 и 3 - го курсов специальностей всех форм обучения по дисциплинам «Теплотехника», «Гидрогазодинамика» и «Энергетические машины и установки»

Составители

канд. техн. наук, доц. Ю.И. Бабенков,

канд. техн. наук, доц. А.И. Озерский,

канд. техн. наук, доц. Ю.В. Коваленко,

канд. техн. наук, доц. В.В. Романов,

ассистент каф. «ТиПГ» Г.А. Галка





Оглавление

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ.....	4
ЛИТЕРАТУРА.....	14

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

В технике широко используются процессы преобразования энергии в потоке, когда газ или пар перемещается из области с одними параметрами в область с другими параметрами. Это, например, расширение газа в специальных каналах турбин, ракетных и авиационных двигателей.

Каналы переменного сечения, в которых происходит расширение газа, а скорость потока возрастает, называются соплами. Каналы, в которых происходит обратный процесс уменьшения скорости и повышения давления, называются диффузорами. Суживающиеся каналы - это дозвуковые сопла, в них газ может быть разогнан только до звуковой скорости. Если после сужения канал расширяется, то такие сопла называются сверхзвуковыми. В них скорость потока W превышает скорость звука a .

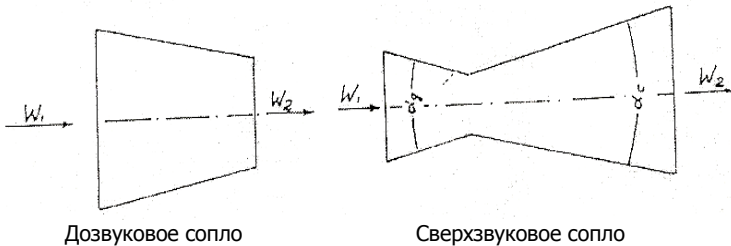


Рис.1. Конфигурация сопел

Расширяющиеся каналы называются диффузорами.

Скорость звука - это скорость распространения упругих колебаний давления в сжимаемой среде.

Известно, что

$$a = \sqrt{kRT}, \quad (1)$$

где a – скорость звука;

k – показатель адиабаты;

R – газовая постоянная;

T – термодинамическая температура.

В дозвуковых соплах скорость на выходе из сопла $W_2 \leq a$ и не может превышать скорость звука. В сверх звуковых соплах поток достигает скорости звука в минимальном сечении капала и далее возрастает и становится больше скорости звука, т. е. $W_2 > a$. Узкое сечение канала называется критическим, а параметры потока в этом сечение также называются критическими.



Расчет истечения газов из сверхзвукового сопла

Ускорение потока осуществляется за счет уменьшения энтропии.

Скорость потока вычисляется по зависимости

$$W_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (2)$$

Здесь P - давление, индекс 1 относится к начальному сечению канала, а 2 - к выходному.

Критические параметры потока, т.е. параметры для сечения, где скорость потока равна местной скорости звука $W = a = W_{кр}$ определяются по следующим зависимостям.

Критическая температура

$$T_{кр} = \frac{2}{k+1} T_1 \quad (3)$$

Критическое давление

$$P_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} P_1 \quad (4)$$

Критическая плотность

$$\rho_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \rho_1 \quad (5)$$

Критическая скорость

$$W_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_1} \quad (6)$$

Расход газа через сопло определяется по уравнению расхода

$$m = \rho W F \quad (7)$$

где F – площадь поперечного сечения сопла.

Расчет истечения газов из сверхзвукового сопла

Расход газа через критические параметры определяется по зависимости

$$m = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} * \frac{F_{кр} P_1}{\sqrt{RT_1}}} \quad (8)$$

Здесь $F_{кр}$ – площадь поперечного сечения узкого сечения сопла. Изменение параметров потока по длине сопла показано на рис.2. Наибольшее изменение параметров потока в критическом сечении.

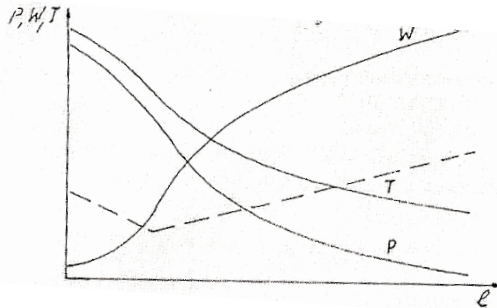


Рис.2. Изменение параметров потока по длине сверх звукового сопла

В дозвуковом сопле скорость на выходе из сопла равна скорости звука, устанавливается при критическом отношении давлений, т.е.

$$\frac{P_H}{P_1} \leq \beta_{кр}, \quad (9)$$

где P_H – давление среды куда истечение. Для двухатомного газа $\beta_{кр} = 0,528$.

Таким образом, если давление на входе в сопло

$$P_1 \geq \frac{P_H}{0,528}$$

то на выходе из сопла устанавливается скорость равная скорости звука. В этом случае расход газа через сопло можно определить по формуле (8). Если

$$\frac{P_H}{P_1} > 0,528,$$

То скорость на выходе из сопла будет дозвуковой и расход газа определяется по зависимости



Расчет истечения газов из сверхзвукового сопла

$$m = F \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_1 \rho_1 \left[\left(\frac{P_H}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_H}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (10)$$

Скорость газа определяется по формуле (2).

Из сопел часто истекают продукты сгорания топлива, т.е. смесь газов. Смеси газов часто задаются по объемным долям.

$$r_i = \frac{V_i}{V} \quad (11)$$

где V_i – объем i – го газа в смеси;

V – Объем смеси.

Молекулярная масса смеси газов определяется по формуле

$$\mu = \sum r_i \mu_i \quad (12)$$

где μ_i – молекулярная масса i – го компонента смеси.

Газовая постоянная смеси газов

$$R = \frac{8314}{\mu}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \quad (13)$$

Мольная теплоемкость при постоянном давлении смеси газов определяется по зависимости

$$C_{\mu P} = \sum C_{\mu P i} r_i \quad (14)$$

где $C_{\mu P i}$ – мольная теплоемкость при постоянном давлении i –го компонента смеси.

Показатель адиабаты

$$k = \frac{C_P}{C_V}, \quad (15)$$

где C_P – теплоемкость смеси газов при постоянном давлении;

C_V – Теплоемкость смеси газов при постоянном объеме.

Мольная теплоемкость газов в зависимости от температуры приводится в таблице 1.

Приведенные формулы дают хорошее совпадение до температуры 1500°С, т.е. до $T = 1773$ °К. При $T > 1773$ °К необходимо учитывать дополнительное тепло, идущее на увеличение колебательной энергии атомов. Увеличение теплоемкости в этом случае можно учесть с помощью следующей поправки

Расчет истечения газов из сверхзвукового сопла

$$C_{\mu P} = C_{\mu P}' \sqrt{\frac{T^{\circ} K}{1773}}, \quad (16)$$

где $C_{\mu P}'$ - значения теплоемкости, определенные по формулам табл.1.1.

Таблица 1.1

Газ	Мольная теплоемкость при $P = \text{const}$, кДж/к моль·К
H ₂	$28,77+11,167 \cdot 10^{-4} t^{\circ}\text{C}$
O ₂	$29,5+34,04 \cdot 10^{-4} t^{\circ}\text{C}$
CO	$29,06+28,18 \cdot 10^{-4} t^{\circ}\text{C}$
CO ₂	$36,5+20,3 \cdot 10^{-3} t - 6,42 \cdot 10^{-6} t^2 t^{\circ}\text{C}$
H ₂ O	$32,89+5,443 \cdot 10^{-3} t^{\circ}\text{C}$
N ₂	$28,97+25,66 \cdot 10^{-4} t^{\circ}\text{C}$

Пример расчета истечения газов из сверхзвукового сопла.

Расчитать геометрические размеры сопла и изменения параметров по длине сопла.

Дано:

- состав газовой смеси в объемных долях, т. е. $r_{\text{H}_2} = 0.06$; $r_{\text{O}_2} = 0.06$; $r_{\text{CO}} = 0.24$; $r_{\text{CO}_2} = 0.37$; $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0.18$; $r_{\text{N}_2} = 0.09$.

- параметры газа на выходе в сопло, т.е. $P_1 = 213 \cdot 10^5$ Па; $T_1 = 3165$ К; $W_1 = 100$ м/с; $m = 53$ кг/с;

- давление на выходе из сопла $P_2 = 0,36 \cdot 10^5$ Па

Необходимо построить профиль сопла и графики изменения параметров.

Решение.

Киломолярная масса смеси

$$\begin{aligned} \mu &= \sum r_i \mu_i = r_{\text{H}_2} \mu_{\text{H}_2} + r_{\text{O}_2} \mu_{\text{O}_2} + r_{\text{CO}} \mu_{\text{CO}} + r_{\text{CO}_2} \mu_{\text{CO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} \mu_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{N}_2} \mu_{\text{N}_2} = \\ &= 0.06 \cdot 2 + 0.06 \cdot 32 + 0.24 \cdot 28 + 0.37 \cdot 44 + 0.18 \cdot 18 + 0.09 \cdot 28 = 30,8 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} \end{aligned}$$

Газовая постоянная смеси

$$R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{30,8} = 270 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Мольная теплоемкость при постоянном давлении отдельных компонентов смеси



Расчет истечения газов из сверхзвукового сопла

$$C_{\mu\text{PH}_2} = 28,77 + 11,167 \cdot 10^{-4} t^\circ \text{C} = 28,77 + 11,167 \cdot 10^{-4} \cdot 2892 = 32 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}},$$

$$C_{\mu\text{PO}_2} = 29,5 + 34,04 \cdot 10^{-4} \cdot 2892 = 39,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}},$$

$$C_{\mu\text{PCO}} = 29,06 + 28,18 \cdot 10^{-4} \cdot 2892 = 37,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}},$$

$$C_{\mu\text{PCO}_2} = 36,05 + 20,3 \cdot 10^{-3} \cdot 2892 - 6,42 \cdot 10^{-6} \cdot 2892^2 = 41,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}},$$

$$C_{\mu\text{PH}_2\text{O}} = 32,89 + 5,443 \cdot 10^{-3} \cdot 2892 = 48,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}},$$

$$C_{\mu\text{PN}_2} = 28,97 + 25,66 \cdot 10^{-4} \cdot 2892 = 36,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}.$$

Мольная теплоемкость при постоянном давлении смеси газов

$$C_{\mu\text{P}}' = C_{\mu\text{PH}_2} \cdot r_{\text{H}_2} + C_{\mu\text{PO}_2} \cdot r_{\text{O}_2} + C_{\mu\text{PCO}} \cdot r_{\text{CO}} + C_{\mu\text{PCO}_2} \cdot r_{\text{CO}_2} + C_{\mu\text{PH}_2\text{O}} \cdot r_{\text{H}_2\text{O}} + C_{\mu\text{PN}_2} \cdot r_{\text{N}_2} =$$

$$32 \cdot 0,06 + 39,3 \cdot 0,06 + 37,2 \cdot 0,24 + 41,1 \cdot 0,37 + 48,6 \cdot 0,18 + 36,4 \cdot 0,09 = 40,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$$

При $T_1 > 1773$ °К в мольную теплоемкость вводится поправка по формуле

$$C_{\mu\text{P}} = C_{\mu\text{P}}' \sqrt{\frac{T_1}{1773}} = 40,4 \sqrt{\frac{3165}{1773}} = 54,0 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}.$$

Массовая теплоемкость при постоянном давлении

$$C_p = \frac{C_{\mu\text{P}}}{\mu} = \frac{54}{30,8} = 1,75 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Мольная теплоемкость при постоянном объеме

$$C_{\mu\text{V}} = C_{\mu\text{P}} - R_{\mu} = 54000 - 8314 = 45700 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} = 45,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}.$$

Здесь R_{μ} – универсальная газовая постоянная.

$$R_{\mu} = 8314 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}.$$

Массовая теплоемкость при постоянном объеме

$$C_V = \frac{C_{\mu\text{V}}}{\mu} = \frac{45,7}{30,8} = 1,48 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Показатель адиабаты

$$k = \frac{C_p}{C_V} = \frac{1,75}{1,48} = 1,18.$$



Расчет истечения газов из сверхзвукового сопла

Расчетные параметры на выходе в сопло.

Давление $P_1 = 213 \cdot 10^5$ Па;

Температура $T_1 = 3165$ К;

Скорость на выходе в сопло $W_1 = 100$ м/с;

Плотность

$$\rho_1 = \frac{P_1}{RT_1} = \frac{213 \cdot 10^5}{270 \cdot 3165} = 24,9 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Площадь поперечного сечения на выходе в сопло

$$F_1 = \frac{m}{\rho_1 \cdot W_1} = \frac{53}{24,9 \cdot 100} = 0,0213 \text{ м}^2.$$

Диаметр выходного сечения сопла

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0213}{3,14}} = 0,165 \text{ м}.$$

Расчет параметров в критическом сечении.

Давление

$$P_{KP} = P_1 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{1,18+1}} = 213 \cdot 10^5 \left(\frac{2}{1,18+1} \right)^{\frac{1,18}{1,18+1}} = 121 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Температура

$$T_{KP} = T_1 \left(\frac{2}{k+1} \right) = 3165 \frac{2}{1,18+1} = 2900 \text{ К}.$$

Площадь критического сечения

$$F_{KP} = \frac{m \sqrt{RT_1}}{P_1 \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}} = \frac{53 \sqrt{270 \cdot 3165}}{213 \cdot 10^5 \sqrt{1,18 \left(\frac{2}{1,18+1} \right)^{\frac{1,18+1}{1,18-1}}}} = 0,00358 \text{ м}^2.$$

Диаметр в критическом сечении

$$d_{KP} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{KP}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00358}{3,14}} = 0,0635 \text{ м}.$$

Скорость в критическом сечении

$$W_{KP} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_1} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,18}{1,18+1} \cdot 270 \cdot 3165} = 962 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Плотность в критическом сечении

$$\rho_{KP} = \frac{P_{KP}}{RT_{KP}} = \frac{121 \cdot 10^5}{270 \cdot 2900} = 15,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Определение параметров на выходе из сопла.



Расчет истечения газов из сверхзвукового сопла

Температура при адиабатном расширении

$$T_2 = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \cdot T_1 = 3165 \left(\frac{0.36}{213} \right)^{\frac{1.18-1}{1.18}} = 1192 \text{ К.}$$

Скорость газа в выходном сечении

$$w_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.18}{1.18-1} \cdot 270 \cdot 3165 \left[1 - \left(\frac{0.36}{213} \right)^{\frac{1.18-1}{1.18}} \right]} = 2642 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Плотность газа в выходном сечении

$$\rho_2 = \frac{P_2}{RT_2} = \frac{0.36 \cdot 10^5}{270 \cdot 1192} = 0.112 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Площадь поперечного сечения

$$F_2 = \frac{m}{\rho_2 w_2} = \frac{53}{0.112 \cdot 2642} = 0.179 \text{ м}^2.$$

Диаметр выходного сечения сопла

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.179}{3.14}} = 0,477 \text{ м.}$$

Задаемся углами сужения сопла в дозвуковой части α_δ и уширения в сверх звуковой части α_c .

Принимаем $\alpha_\delta = 90^\circ$, $\alpha_c = 60^\circ$.

Длина до звуковой части сопла

$$l_\delta = \frac{d_1 - d_{kp}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_\delta}{2}} = \frac{0.165 - 0.0675}{2 \operatorname{tg} \frac{90}{2}} = 0.0488 \text{ м.}$$

Длина сверхзвуковой части сопла

$$l_c = \frac{d_2 - d_{kp}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_c}{2}} = \frac{0.477 - 0.0675}{2 \operatorname{tg} \frac{60}{2}} = 0.3542 \text{ м.}$$

Длина сопла

$$l = l_\delta + l_c = 0.0488 + 0.3542 = 0.403 \text{ м.}$$



Расчет истечения газов из сверхзвукового сопла

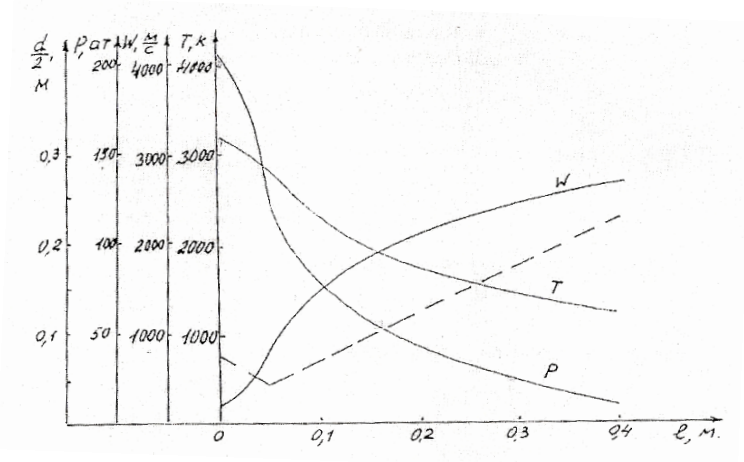


Рис.3. Профиль сопла и график изменения P,W,T по длине сопла

Задание по расчету сверх звукового сопла.



Расчет истечения газов из сверхзвукового сопла

Номер варианта соответствует номеру группы списка

Требуется рассчитать изменение параметров газа при равновесном адиабатном течении в сверхзвуковом сопле с прямолинейными образующими.

Заданны в таблице П.1 следующие параметры:

Таблица П1

№	P ₁ МПа	P ₂ МПа	T ₁ К	m Кг/с	Состав смеси в объемных долях r ₁					
					H ₂	O ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	N ₂
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	25	0,05	3180	300	0,07	-	0,11	0,10	0,47	0,25
2	20	0,1	3220	290	0,02	0,02	0,05	0,14	0,51	0,26
3	6	0,1	1040	280	-	0,42	-	0,05	0,28	0,25
4	10	0,05	3650	270	0,10	0,01	0,36	0,13	0,40	-
5	2	0,05	3260	260	0,05	0,03	0,125	0,09	0,405	0,30
6	20	0,05	3700	250	0,15	0,02	-	-	0,83	-
7	25	0,1	2050	240	-	0,69	-	0,09	0,17	0,05
8	25	0,02	3800	230	0,07	0,04	0,14	0,11	0,51	0,13
9	6	0,02	3650	220	0,03	0,12	0,21	0,22	0,42	-
10	10	0,1	3000	210	0,12	-	0,15	0,07	0,42	0,24
11	15	0,05	2000	200	-	0,75	-	0,13	0,12	-
12	2	0,05	3400	190	0,22	0,02	-	-	0,76	-
13	10	0,05	3450	180	0,03	0,03	0,08	0,12	0,41	0,33
14	2	0,02	3500	170	0,11	0,02	0,36	0,12	0,39	-
15	25	0,05	3550	160	0,03	0,04	0,08	0,13	0,40	0,32
16	2	0,02	3200	150	0,12	0,06	-	-	0,82	-
17	25	0,1	3420	140	0,14	-	0,21	0,07	0,44	0,14
18	2	0,1	3540	130	0,12	-	0,15	0,08	0,42	0,23
19	15	0,05	3180	120	0,07	0,01	0,14	0,08	0,40	0,30
20	2	0,02	3250	110	0,01	0,32	-	-	0,67	-
21	15	0,05	3140	100	0,09	0,02	0,18	0,09	0,48	0,14
22	2	0,1	3250	90	0,07	0,06	0,15	0,10	0,49	0,13
23	15	0,05	3470	80	0,07	-	0,10	0,11	0,48	0,24
24	25	0,02	3520	70	0,06	0,03	0,30	0,18	0,43	-
25	2	0,05	3450	60	0,14	0,01	0,21	0,06	0,445	0,135
26	2	0,02	3300	50	-	0,69	-	0,09	0,17	0,05
27	10	0,1	3100	40	0,12	-	0,17	0,04	0,39	0,28
28	6	0,02	2900	30	0,22	0,01	-	-	0,77	-
29	15	0,05	3000	20	0,04	0,07	0,12	0,13	0,51	0,13
30	6	0,02	3240	10	0,11	0,04	-	-	0,85	-

В данной таблице: r₁ – состав газа в объемных долях; P₁ и T₁ – параметры газа на входе в сопло; P₂ – давление на выходе из сопла; m – расход газа: скорость газа; скорость газа на выходе в сопло принять в пределах W = 60 – 120 м/с.

Необходимо рассчитать:

- основные параметры, т.е. давление, температуру, плотность, скорость истечения в трех сечениях: на входе, в критическом сечении и на выходе из сопла.

Изобразить сопло в масштабе и построить графики изменения давления, температуры и скорости по длине сопла.



ЛИТЕРАТУРА

1. Бабенков Ю.И. Теоретические основы теплотехники / Ю.И. Бабенков и др. - Ростов н/Д: Издательский ДГТУ, 2012.
2. Теплотехника / под ред. В.Н. Луканина. –М.: Высш. шк. 2008.