

УДК 536.24:621.036:621.793

АЭРОДИНАМИКА И ТЕПЛОФИЗИКА СГОРАНИЯ ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ АКТИВИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

*д-р техн. наук, проф. В.С. ИВАШКО, канд. техн. наук, доц. К.В. БУЙКУС
(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск),
д-р техн. наук, проф. М.Л. ХЕЙФЕЦ
(Полоцкий государственный университет)*

Разработана модель аэродинамики и теплофизики сгорания пропано-воздушной смеси при активированной дуговой металллизации. Проанализированы температуры и скорости двухфазного потока по дистанции напыления при различных режимах работы металлизатора.

Среди множества факторов, влияющих на качество покрытия в процессе восстановления детали, главными являются скорость и температура частиц напыляемого материала в момент столкновения с основой [1]. Поэтому необходима модель, позволяющая прогнозировать температуры и скорости движения частиц и газа и обеспечивающая аналитические оценки влияния параметров напыления на качество покрытия.

При активизации дуговой металллизации расширяются возможности регулирования процесса за счет изменения состава транспортирующего газа, что влияет на температуру, скорость и окислительную способность газового потока.

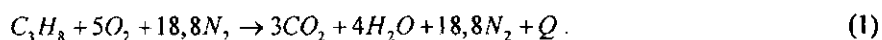
При построении модели использовались следующие допущения:

- турбулентный поток при своем движении увлекает жидкие частицы, на которые действует только сила аэродинамического сопротивления газа;
- величина и направление силы лобового сопротивления определяется относительной скоростью обтекания частицы сплошной средой;
- действием остальных сил можно пренебречь;
- истечение газа из сопла происходит в соответствии с теорией турбулентной струи для осесимметричного источника и неподвижной окружающей среды;
- движение и теплообмен газа и частицы осуществляются в соответствии с теорией двухфазных потоков, согласно которой в каждом микрообъеме обмен импульсом и теплотой происходит достаточно быстро;
- частицы имеют сферическую форму и, следовательно, тепловое поле в ней является сферически симметричным;
- частицы в потоке не взаимодействуют между собой из-за малой объемной концентрации;
- расчет ведется только по длине оси струи, так как скорость частицы в направлении, перпендикулярном оси струи, значительно меньше, чем в осевом;
- путь, пройденный частицей от сопла металлизатора по направлению к основе, разбивается на конечное число отрезков, причем количество разбиений зависит от требуемой точности вычисляемых параметров, а вычисленные параметры предыдущего отрезка пути являются начальными для следующего;
- в пределах малого отрезка пути основные теплофизические параметры частицы и окружающей ее среды (струи) не изменяются и остаются постоянными, а частица движется равноускоренно.

В теплотехнических расчетах различают калориметрическую температуру горения T_k , подсчитываемая без учета потерь тепла вследствие диссоциации продуктов горения, и теоретическую температуру горения T_m , которая определяется с учетом тепла диссоциации продуктов горения при высокой температуре. Калориметрическая и теоретическая температуры горения зависят от состава горючей смеси, температуры воздуха и газа.

При расчете максимальной температуры пламени считается, что процесс горения происходит адиабатически. При этом принимается, что весь кислород воздуха участвует в реакции горения [2].

Реакция горения пропана происходит по уравнению:



Расчет калориметрической температуры выполняется методом последовательных приближений. Задаемся температурой 2100 °С и по теплофизическим таблицам [3, с. 157, табл. 10.9] определяем сред-

ние теплоемкости c'_{mp} для CO_2 , H_2O и N_2 . Подсчитываем, какой теплотворной способностью обладал бы пропан, если бы при его сгорании в стехиометрическом объеме развивалась температура 2100 °С:

$$Q_p = (Ac'_{mpCO_2} + Bc'_{mpH_2O} + Cc'_{mpN_2})T_1, \quad (2)$$

где A, B, C – количество молей веществ в реакции горения: $A = 3, B = 4, C = 18,8$; $c'_{mpCO_2} = 0,582$ ккал/(моль·м³·К); $c'_{mpH_2O} = 0,473$ ккал/(моль·м³·К); $c'_{mpN_2} = 0,354$ ккал/(моль·м³·К).

Полученная величина $Q_{p1} = 21616$ ккал/м³ меньше нижней теплотворной способности пропана (Q'_p), равной 22800 ккал/м³ [3, с. 96, табл. 7.6], следовательно, calorиметрическая температура пропана выше 2100 °С.

Задаемся температурой 2200 °С и делаем аналогичный расчет: $Q_{p2} = 22645$ ккал/м³.

Эта величина выше Q'_p . Интерполяцией определяем calorиметрическую температуру:

$$T_k = T_1 + (Q'_p - Q_{p1})(T_2 - T_1)/(Q_{p2} - Q_{p1}). \quad (3)$$

$T_k = 2215$ °С.

Коэффициент избытка воздуха определяется по формуле:

$$\alpha = V_a / V_a^o, \quad (4)$$

где V_a – объем поступившего воздуха, м³; V_a^o – теоретический объем воздуха, требуемый для полного 1 м³ газа; $V_a^o = 23,8$ м³ [4, с. 25, табл. 3.1].

Коэффициент α можно также выразить через расходы воздуха и пропана:

$$\alpha = (G_a / G_p) / 23,8, \quad (5)$$

где G_a – расход воздуха, м³/ч; G_p – расход пропана, м³/ч.

Коэффициент избытка воздуха α_{min} , соответствующий нижнему пределу воспламеняемости, равен 0,4. Коэффициент избытка воздуха α_{max} , соответствующий верхнему пределу воспламеняемости, равен 1,7 [4, с. 25, табл. 3.1].

Расчет calorиметрической температуры горения при отличных от 1 коэффициентах избытка воздуха выполняется также методом последовательных приближений.

Мольный объем углекислого газа в продуктах горения пропано-воздушной смеси $V_{CO_2} = 3$ м³.

Мольный объем водяных паров в продуктах горения пропано-воздушной смеси $V_{H_2O} = 4$ м³.

Мольный объем воздуха в продуктах горения пропано-воздушной смеси:

$$V_{возд} = 0,21(\alpha - 1)V_a^o. \quad (6)$$

Мольный объем азота, включая аргон и другие благородные газы:

$$V_{N_2} = 0,79\alpha V_a^o. \quad (7)$$

Общий объем продуктов горения пропано-воздушной смеси:

$$V_{nc} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{возд} + V_{N_2}. \quad (8)$$

Общий объем остаточного воздуха:

$$V_a^{ост} = V_a - V_a^o = (G_a / G_p) - 23,8. \quad (9)$$

Процентное содержание углекислого газа в продуктах горения:

$$X_{CO_2} = V_{CO_2} / V_{nc}. \quad (10)$$

Процентное содержание водяных паров в продуктах горения:

$$X_{H_2O} = V_{H_2O} / V_{nc}. \quad (11)$$

Процентное содержание воздуха:

$$X_{\text{возд}} = V_{\text{с}}^{\text{осм}} / V_{\text{нс}} \quad (12)$$

Процентное содержание азота, с учетом того, что азот входит не только в состав продуктов сгорания, но и в состав остаточного воздуха:

$$X_{N_2} = (V_{N_2} - 0,79V_{\text{с}}^{\text{осм}}) / V_{\text{нс}} \quad (13)$$

Начальное теплосодержание продуктов горения i_0 , ккал/м³, определяется по формуле:

$$i_0 = Q_p^u / V_{\text{нс}} \quad (14)$$

Теплосодержания продуктов горения i_1 и i_2 , ккал/м³, при температуре $T_{\text{в}} = 2000$ °С и $T_{\text{н}} = 1800$ °С соответственно определяются по формулам:

$$i_1 = (X_{CO_2} c'_{\text{пр}CO_2} + X_{H_2O} c'_{\text{пр}H_2O} + X_{N_2} c'_{\text{пр}N_2} + X_{\text{возд}} c'_{\text{првозд}}) T_{\text{в}} \quad (15)$$

$$i_2 = (X_{CO_2} c'_{\text{пр}CO_2} + X_{H_2O} c'_{\text{пр}H_2O} + X_{N_2} c'_{\text{пр}N_2} + X_{\text{возд}} c'_{\text{првозд}}) T_{\text{н}} \quad (16)$$

где $c'_{\text{првозд}}$ – теплоемкость воздуха; $c'_{\text{првозд}} = 0,358$ ккал/(моль·м³·К) [3, с. 157, табл. 10.9].

Калориметрическая температура горения пропано-воздушной смеси:

$$T_{\text{к}} = T_{\text{н}} + (i_0 - i_2)(T_{\text{в}} - T_{\text{н}})/(i_1 - i_2) \quad (17)$$

Расчетная температура горения T_p отличается от калориметрической тем, что при определении T_p учитывается теплота диссоциации продуктов горения. При температуре выше 1500 °С CO_2 диссоциирует с образованием CO и O_2 , H_2O диссоциирует с образованием H_2 и O_2 .

Теплота диссоциации CO_2 :

$$\Delta Q_d^{CO_2} = X_{CO_2} a Q_{CO_2} \quad (18)$$

где a – степень диссоциации CO_2 при $T_{\text{к}}$ [5, с. 23, табл. 4]; Q_{CO_2} – теплотворная способность CO_2 , $Q_{CO_2} = 3030$ ккал [6, с. 351, табл. 7.7].

Теплота диссоциации H_2O :

$$\Delta Q_d^{H_2O} = X_{H_2O} b Q_{H_2O} \quad (19)$$

где b – степень диссоциации H_2O при $T_{\text{к}}$ [5, с. 25, табл. 5]; Q_{H_2O} – теплотворная способность H_2O , $Q_{H_2O} = 2580$ ккал [7, с. 276, табл. 6.2].

Объем продуктов горения в результате диссоциации CO_2 и H_2O возрастает, однако теплосодержание продуктов горения недиссоциированных и частично диссоциированных при той же температуре практически не меняется вследствие более высокой объемной теплоемкости исходных трехатомных газов CO_2 и H_2O , по сравнению с теплоемкостью образующихся двухатомных газов.

Так как при температуре до 2100 °С диссоциирует лишь малая часть CO_2 и H_2O , то для технического расчета температуры горения можно принять, что произведение объемов продуктов горения на их средневзвешенную теплоемкость в температурном интервале от 0 до T_p не меняется в результате диссоциации CO_2 и H_2O .

Объемная средневзвешенная теплоемкость продуктов горения c определяется по формуле:

$$c = c'_{\text{пр}CO_2} X_{CO_2} + c'_{\text{пр}H_2O} X_{H_2O} + c'_{\text{пр}N_2} X_{N_2} + c'_{\text{првозд}} X_{\text{возд}} \quad (20)$$

При таком допущении расчетная температура горения пропано-воздушной смеси T_p может быть определена по формуле:

$$T_p = \frac{Q_p^u - (\Delta Q_d^{CO_2} + \Delta Q_d^{H_2O})}{V_{\text{нс}} c + V_{\text{с}}^{\text{осм}} c'_{\text{првозд}}} \quad (21)$$

График, отражающий влияние коэффициента избытка воздуха в горючей смеси α на температуру продуктов горения, представлен на рисунке 1.

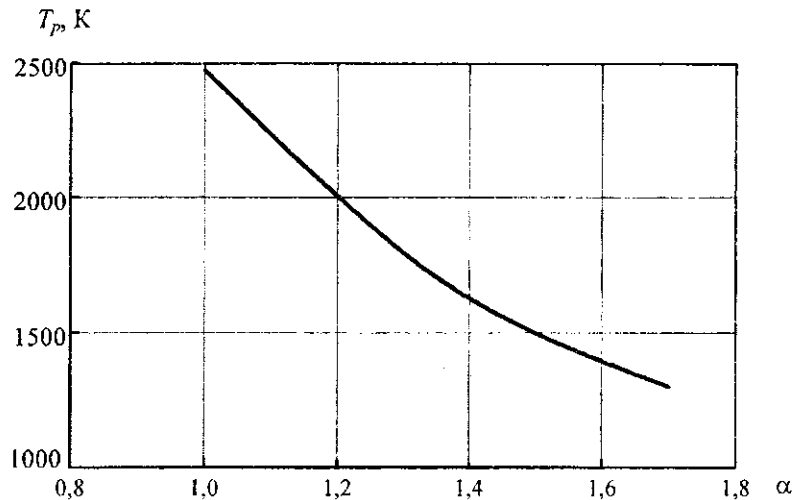


Рис. 1. Влияние коэффициента избытка воздуха в горючей смеси на температуру продуктов горения

Максимальная величина температуры продуктов сгорания имеет место при $\alpha < 1$ (при недостатке окислителя). Это объясняется тем, что продукты сгорания углеводородов при $\alpha < 1$ содержат большее количество CO , которое хотя и является продуктом неполного сгорания, но в то же время сравнительно устойчиво против дальнейшей диссоциации. Вследствие этого при $\alpha < 1$ затраты тепла на диссоциацию снижаются, что и приводит к повышению температуры пламени. Причем избыток пропана создает восстановительную защитную атмосферу в распыляющем потоке. Однако, при неполном сгорании топлива, как известно, интенсивно образуется угарный газ CO , который неизбежно попадает в помещение для напыления. К тому же при избытке пропана, который также попадает в помещения для напыления, образуя взрывоопасную смесь, падает экономическая эффективность активированной дуговой металлизации.

С учетом вышесказанного все тепловые расчеты проводятся при коэффициенте избытка воздуха $\alpha \geq 1$.

Струя вылетающих из сопла продуктов горения является свободной и затопленной, так как она не ограничена твердыми стенками и распространяется в пространстве, заполненном средой тех же физических свойств, что и вещество струи. Поэтому струя имеет два участка -- начальный и основной. Причем на начальном участке параметры струи остаются неизменными и равными параметрам струи на срезе сопла [8, с. 24].

Расположение полюса струи [8, с. 93]:

$$h_0 = R_c \frac{0,29}{a}, \quad (22)$$

где R_c -- радиус отверстия сопла, мм; a -- коэффициент турбулизации потока.

Величина коэффициента турбулизации потока a существенно влияет на затухание скорости по мере удаления от сопла и зависит от диаметра и длины воздушного сопла. Электродные проволоки вызывают дополнительную турбулизацию струи и повышение степени затухания скорости распыляющего потока.

Влияние диаметра проволок на коэффициент турбулизации потока видно из уравнения [9, с. 46]:

$$a = \left(0,4 \frac{d_p}{2R_c} \right)^{2,56} + a_1, \quad (23)$$

где d_p -- диаметр электродной проволоки; a_1 -- коэффициент турбулентности для данного сопла в случае отсутствия электродных проволок (например, для сопла диаметром 6 мм $a_1 = 0,056$, для сопла диаметром 3 мм $a_1 = 0,057$).

С аэродинамической точки зрения целесообразно применять более тонкие проволоки, так как при этом осевая скорость потока убывает по мере удаления от сопла менее интенсивно и, следовательно, не требуется строго выдерживать установленное расстояние между соплом аппарата и поверхностью детали.

Длина начального участка струи [8, с. 93]:

$$s_0 = R_c \frac{0,67}{a}. \quad (24)$$

Длина участка от полюса до некоторого сечения струи:

$$x = L + h_0, \quad (25)$$

где L – расстояние от сопла до некоторого сечения струи, мм.

Начальная скорость струи определяется из уравнения состояния [10, с. 113, (3.5)]:

$$V_0 = \sqrt{\frac{2gkR}{(k-1)} T_0 \left[1 - \left(\frac{p_n}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (26)$$

где g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; p_n – давление горючей смеси пропана и воздуха, поступающей в камеру сгорания:

$$p_n = p_a \frac{23,8\alpha}{23,8\alpha + 1} + p_p \frac{1}{23,8\alpha + 1}, \quad (27)$$

p_a – давление сжатого воздуха на входе в металлатор, МПа; p_p – давление пропана на входе в металлатор, МПа; p_0 – давление потока продуктов горения на срезе сопла [11, с. 222]:

$$p_0 = p_n \frac{T_p}{T_n}, \quad (28)$$

k – показатель адиабаты струи:

$$k = \frac{V_a^{acm}}{V_{nc}} k_a + \frac{V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}}{V_{nc}} k_{nc}, \quad (29)$$

где k_a – показатель адиабаты воздуха без примесей, $k_a = 1,4$ [12, с. 41]; k_{nc} – показатель адиабаты продуктов горения без примеси воздуха, $k_{nc} = 1,2$; R – газовая постоянная, кг·м/(кг·К):

$$R = \frac{848}{\mu_{cm}}, \quad (30)$$

μ_{cm} – молекулярный вес смеси продуктов горения:

$$\mu_{cm} = \mu_{CO_2} X_{CO_2} + \mu_{H_2O} X_{H_2O} + \mu_{N_2} X_{N_2} + \mu_{вод} X_{вод}, \quad (31)$$

$\mu_{CO_2} = 44,0098 \text{ кг·м/(кг·град)}$ [13, с. 75]; $\mu_{H_2O} = 18,0152 \text{ кг·м/(кг·град)}$ [13, с. 147];

$\mu_{N_2} = 28,0134 \text{ кг·м/(кг·град)}$ [13, с. 49]; $\mu_{вод} = 28,95 \text{ кг·м/(кг·град)}$ [13, с. 99].

На рисунке 2 показано как коэффициент избытка воздуха влияет на начальную скорость струи продуктов горения.

Закон падения температуры вдоль оси турбулентной струи круглого сечения выведен на основании постоянства теплосодержания струи [8, с. 99, (19.7)]:

$$\frac{\alpha x}{R_c} = \frac{\Delta T_0}{\Delta T_c} \sqrt{0,36 \left(1 - \frac{T_n}{T_0} \right) \frac{\Delta T_c}{\Delta T_0} + 0,495 \frac{T_n}{T_0}}, \quad (32)$$

где $\Delta T_0 = T_0 - T_n$ – разность между температурами в начальном сечении струи и в окружающем пространстве; $\Delta T_c = T_c - T_n$ – разность между температурами на оси струи и в окружающем пространстве.

Решением квадратного уравнения (32) относительно T_c является выражение:

$$T_c(x) = \frac{0,18(T_0 - T_n)^2 + \sqrt{0,18^2(T_0 - T_n)^4 + 0,495T_0 \left(\frac{a \cdot x}{R_c}\right)^2 T_n (T_0 - T_n)^2}}{T_0 \left(\frac{a \cdot x}{R_c}\right)^2} + T_n. \quad (33)$$

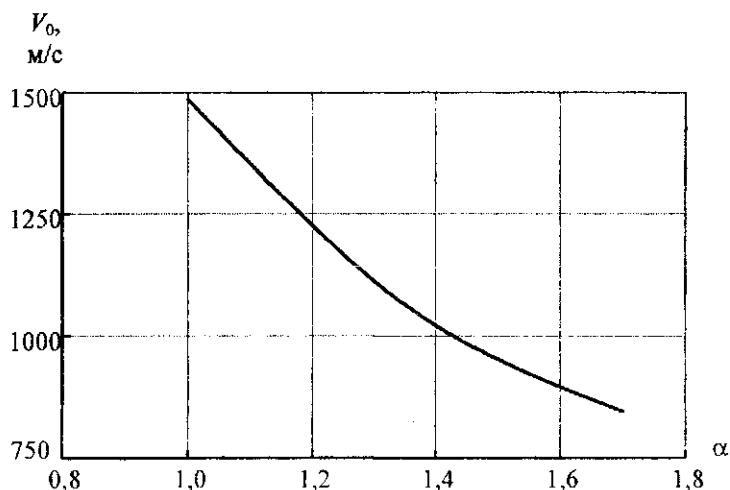


Рис. 2. Влияние коэффициент избытка воздуха (α) на начальную скорость струи продуктов горения (V_0)

Зависимость скорости струи от дистанции напыления определяется из закона падения скорости вдоль оси турбулентной газовой струи круглого сечения [12, с. 24, (2.3)]:

$$\frac{ax}{R_c} = \frac{V_0}{V} \sqrt{0,495 \left(1 - \frac{T_n}{T_0}\right) \frac{V}{V_0} + 0,93 \frac{T_n}{T_0}}. \quad (34)$$

После преобразования получаем квадратное уравнение:

$$V^2 \frac{a^2 x^2}{R_c^2} - V 0,495 V_0 \left(1 - \frac{T_n}{T_0}\right) - 0,93 \frac{T_n}{T_0} V_0^2 = 0. \quad (35)$$

Корень квадратного уравнения с положительным значением определяется по формуле:

$$V = \frac{0,495 V_0 \left(1 - \frac{T_n}{T_0}\right) + \sqrt{\left(0,495 V_0 \left(1 - \frac{T_n}{T_0}\right)\right)^2 + 3,72 \frac{a^2 x^2 T_n V_0^2}{R_c^2 T_0}}}{2 \left(\frac{ax}{R_c}\right)^2}. \quad (36)$$

Скорость двухфазной газовой струи вычисляется с учетом поправочного коэффициента ε концентрации примеси (металлических частиц) [8, с. 254]:

$$V_c = V \varepsilon; \quad (37)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{0,567 R_c}{ax} \chi_0}}; \quad (38)$$

где χ_0 – концентрация примеси:

$$\chi_0 = \frac{G_{\text{прм}}}{G_{\text{зм}}}, \quad (39)$$

где $G_{прм}$ – массовый расход проволоки (производительность напыления), кг/ч; $G_{гм}$ – массовый расход распыляющего газа:

$$G_{гм} = G_{ам} + G_{пм} \quad (40)$$

где $G_{ам}$ – массовый расход сжатого воздуха; $G_{пм}$ – массовый расход пропана.

$$G_{ам} = G_в \gamma_в; \quad (41)$$

$$G_{пм} = G_п \gamma_п; \quad (42)$$

где $\gamma_в, \gamma_п$ – плотности воздуха и пропана соответственно, $\gamma_в = 1,29 \text{ кг/м}^3$, $\gamma_п = 2,00 \text{ кг/м}^3$ [3, с. 57, табл. 5.2].

Заключение

Разработана модель аэродинамики и теплофизики сгорания пропано-воздушной смеси при активированной дуговой металлизации.

Модель позволяет анализировать параметры двухфазного потока по дистанции напыления при различных режимах работы металлизатора и выбирать оптимальные параметры процесса активированной дуговой металлизации при модернизации оборудования и разработке новых технологических процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по гранту Т05К-042 «Сквозное проектирование ресурсосберегающих технологий и средств оснащения электрофизических и термомеханических процессов упрочнения поверхностей изделий».

ЛИТЕРАТУРА

1. Взаимодействие дисперсных частиц с несущим потоком при высокоскоростном газопламенном напылении / Ю.И. Евдокименко, В.М. Кисель, В.Х. Кадыров, В.В. Пасичный, А.И. Сосиков // Порошковая металлургия. – 1996. – № 3 – 4. – С. 54 – 60.
2. Некрасов Ю.Н. Определение температуры камерно-вихревого горения пропано-воздушного пламени // Горелки, редукторы, механизация резки и металлизация: Сб. науч. тр. / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т Автогенмаш. – М.: Машиностроение, 1969. – Вып. 16. – С. 77 – 83.
3. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1004 с.
4. Газобаллонные автомобили: Справочник / А.И. Морев, В.И. Ерохов, Б.А. Бекетов и др. – М.: Транспорт, 1992. – 175 с.
5. Равич М.Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов. – М.: Наука, 1966. – 416 с.
6. Вукалович М.П., Алтунин В.В. Теплофизические свойства двуокиси углерода. М.: Атомиздат, 1965. – 455 с.
7. Вукалович М.П., Ривкин С.Л., Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – 408 с.
8. Абрамович Г.Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов. – М.: Госэнергоиздат, 1948. – 288 с.
9. Катц Н.В. Металлизация распылением. – М.: Машиностроение, 1966. – 212 с.
10. Зуев В.С., Макарон В.С. Теория прямоточных и ракетно-прямоточных двигателей. – М.: Машиностроение, 1971. – 368 с.
11. Карпов В.П. Основы технической термодинамики. – М.: Машигиз, 1948. – 316 с.
12. Абрамович Г.Н. Газовая динамика воздушно-реактивных двигателей. – М.: Изд-во «Бюро новой техники», 1947. – 224 с.
13. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. – М.: Физматгиз, 1959. – 356 с.