

Список використаних джерел

1. О.ИГ.5665.ПЛ-07. Положение об организации эксплуатации производственных зданий и сооружений.
2. *Кряжич О.А.* Новые технологии тушения пожаров и локализации радиоактивной пыли в труднодоступной радиоактивной зоне «Фукусимы-2» / О.А. Кряжич, В.Д. Захматов, Н.В. Щербак // Труды Седьмой всероссийской науч.-практ. конф. «Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму», Санкт-Петербург, апрель 2012 г. – СПб.: Любавич, 2012. – С. 204 - 213.
3. ТИ 34-70-049-86. Типовая инструкция по эксплуатации производственных зданий и сооружений.
4. ДБН В.3.1-1-2002. Ремонт и усиление несущих и ограждающих строительных конструкций и оснований промышленных зданий.
5. О.КС.1743.ПЛ-07. Положення з організації виконання господарським способом будівельно-монтажних робіт в новому будівництві, при реконструкції і модернізації об'єктів ВП «Хмельницька АЕС» та відображення освоєних капітальних витрат.
6. О.ЦР.5 326.РК-09. Настанова з якості ремонтно-будівельних робіт.
7. 7.0.ЦР.1233.ПЛ-07. Положення про ремонтно-будівельне управління енергоремонтного підрозділу ВП ХАЕС.
8. О.ПР.6235.ПЛ-07. Положение о порядке подготовки и выполнении ремонтных работ подразделениями ХАЭС в зоне действующего оборудования с привлечением подрядных организаций.
9. *Цезарук М.А.* Підвищення якості планування та проведення поточних і капітальних ремонтів виробничих будівель, споруд та антикорозійного покриття трубопроводів на ВП ХАЕС ДП НАЕК «ЕНЕРГОАТОМ» / М.А. Цезарук. – Севастополь: СНУЯЕтаП, 2013. – 106 с.

Надійшла до редакції 15.11.2013 р.

УДК 533.17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ РЕАЛЬНОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА

В.И. Сиваков¹, инж., И.В. Сиваков², инж., Ю.В. Браславский¹, к.т.н.

¹Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

²АО «СК Авлита», г. Севастополь

Получена аналитическая формула теплоемкости реального (вязкого) газового потока, дано ее экспериментальное подтверждение.

Введение

В теплотехнических расчетах часто необходимы числовые значения теплоемкости газа, соответствующей условиям расчета. Аналитическая зависимость теплоемкости газа в настоящее время, на наш взгляд, дается в виде сложных эмпирических уравнений, которые неудобны для практических расчетов, ограничены диапазоном использо-

вания и имеют недостаточную точность результатов расчетов [1]. Поэтому, как правило, теплоемкость газа определяется на основании трудоемких экспериментальных исследований и сложных математических вычислений [3]. В связи с этим необходимо получить формулу теплоемкости газового потока, которой можно пользоваться в первом приближении при различных инженерных теплотехнических расчетах.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является вывод формулы теплоемкости реального газового потока, которая упростит теплотехнические расчеты. Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие научные задачи: во-первых, определить функциональную связь между полем скоростей реального газового потока и теплоемкостью идеального газа, во-вторых, экспериментально подтвердить полученную формулу теплоемкости реального газового потока.

Вывод расчетной формулы теплоемкости реального (вязкого) газового потока

В данной работе исследуются политропные процессы в газовом потоке, показатель политропы которых m изменяется в пределах $1 \leq m \leq k$, где k – показатель изэнтропы данного газа, то есть исследуются термодинамические процессы, лежащие между изэнтропой и изотермой и подчиняющиеся закону $p v^m = \text{const}$, где p, v – давление и удельный объем, соответственно.

Из работы [1] теплоемкость идеального газа в политропном процессе определяется по формуле

$$C_m = C_v \frac{m - k}{m - 1}, \quad (1)$$

где C_v – изохорная теплоемкость идеального газа.

Подставим в формулу (1) показатель политропы m , разработанный нами для реального газового потока с неравномерным полем скоростей в работе [2]. Этот показатель определяется следующей зависимостью:

$$m = \left[1 - \frac{k - 1}{k} \cdot j_m^2 \right]^{-1}, \quad (2)$$

где j_m – политропный коэффициент скорости реального газового потока.

Тогда после некоторых преобразований получим формулу, которая определяет теплоемкость реального газового потока:

$$C_m = C_p \frac{j_m^2 - 1}{j_m^2}, \quad (3)$$

где C_p – изобарная теплоемкость данного идеального газа.

Из формулы (3) следует, что:

- теплоемкость реального газового потока зависит только от политропного коэффициента скорости, то есть определяется полем скоростей данного газового потока;
- теплоемкость газового потока не зависит от абсолютного значения термодинамических параметров газа;
- теплоемкость газа, показатель политропы которой лежит в пределах, выше указанных, величина отрицательная.

Экспериментальное подтверждение расчетной формулы теплоемкости

Для подтверждения правильности расчетной формулы теплоемкости (3) воспользуемся табличными данными перегретого пара, представленными в работе [3]. Для этих целей используем энтропию перегретого пара S , но не ее абсолютное значение, а ее изменение в термодинамическом процессе, то есть $\Delta S = S_a - S_0$, где S_0, S_a – энтропия перед каналом и за каналом, соответственно, в процессе расширения перегретого пара.

Из работы [1] изменение энтропии в термодинамическом процессе определяется следующей зависимостью:

$$\Delta S = C_m \ln \frac{T_a}{T_0}, \quad (4)$$

где T_0, T_a – температура перегретого пара перед каналом и за ним, соответственно.

Выразим отношение температуры пара через соответствующее отношение давления по формуле

$$\frac{T_a}{T_0} = \left(\frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{m-1}{m}} = e_a^{\frac{m-1}{m}} = e_a^{\frac{k-1}{k} j_m^2}.$$

Из формулы (2)

$$\frac{m-1}{m} = \frac{k-1}{k} \cdot j_m^2.$$

Подставив T_a/T_0 и C_m из формулы (3) в формулу (4), получим

$$\Delta S = S_a - S_0 = C_p \frac{k-1}{k} (j_m^2 - 1) \ln e_a.$$

Но $C_p \frac{k-1}{k} = R$ – газовая постоянная перегретого пара.

Тогда

$$\Delta S = R(j_m^2 - 1) \ln e_a. \quad (5')$$

Разделив уравнение (5') на S_0 , получим

$$\frac{\Delta S}{S_0} = \frac{R}{S_0} (j_m^2 - 1) \ln e_a. \quad (5)$$

Уравнение (5) является исходным для определения изменения энтропии, а вместе с ней – и теплоемкости газового потока.

Из анализа уравнения (5) следует:

- изменение энтропии не зависит от абсолютного значения термодинамических параметров газового потока;
- изменение энтропии определяется относительным противодавлением газового потока за каналом e_a и полем скоростей j_m в канале.

Для подтверждения работоспособности формул (3) и (5) были привлечены табличные данные в широком диапазоне изменения термодинамических параметров. Так, давление перегретого пара $P_0 = 0,1 \dots 20,0$ МПа, энтропия $S_0 = 938,54 \dots 691,446 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Для конкретизации расчетов были взяты критические отношения давлений $e_k^* = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$, каждому из которых соответствует политропный коэффициент скорости $j_m = 0,513; 0,613; 0,709; 0,813; 0,934$, которые определялись по формуле

$$j_m = \sqrt{\frac{\ln e_s^*}{\ln e_k^*}} \text{ из работы [2].}$$

Рассмотрим методику нахождения табличных данных из работы [3], чтобы их можно было сравнить с расчетными данными по формуле (5). Для этого изобразим процесс расширения перегретого пара в диаграмме h, S (энтальпия-энтропия) на рис. 1.

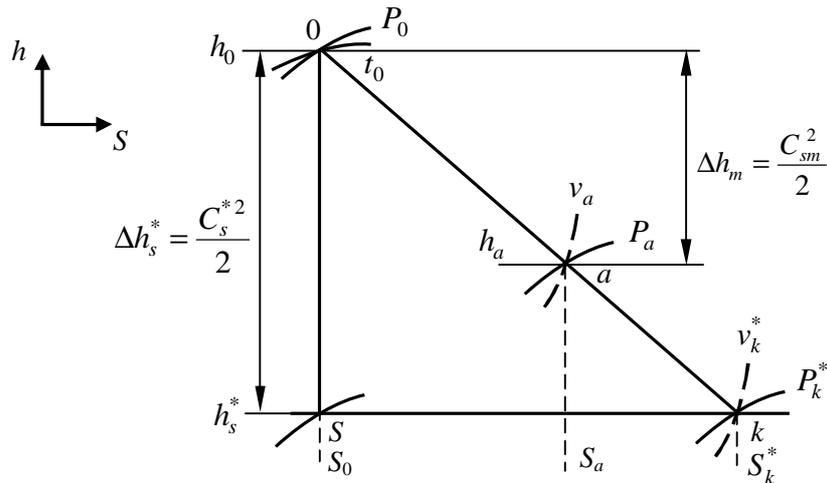


Рис. 1. Схема расширения перегретого пара в диаграмме h, S

Из точки 0 пар расширяется по политропе Ok с показателем политропы m до тех пор, пока не достигнет критической скорости в выходном сечении канала. Это будет точка k , которая определяется двумя способами. Первый – на пересечении энтальпии h_s^* и критического давления P_k^* . Второй – на пересечении критических параметров P_k^* и удельного объема v_k^* . Необходимые параметры определяются следующим образом:

$$P_k^* = e_k^* P_0; h_s^* = h_0 - \frac{C_s^{*2}}{2}; C_s^* = \sqrt{\frac{2k}{k+1}} P_0 v_0; v_k^* = \frac{v_0}{e_k^{*1/m}}.$$

С этими параметрами входим в таблицу [3], находим столбец с давлением P_k^* и опускаемся по столбцу до тех пор, пока не найдем параметр h_s^* или v_k^* . Рядом с ним находится нужный нам параметр S_k^* . Если же в столбце P_k^* параметры h_s^* и v_k^* отличаются от расчетных, то необходимо провести интерполяцию этих значений, а вместе с ними – и S_k^* . Затем по формуле (5'), зная e_k^* и j_m , определяем ΔS , а вместе с ней – и $S_{\text{расч}} = S_0 + \Delta S$. Погрешность между табличным значением S_k^* и расчетным составила не более 1%. Таким же образом проверяем другие критические режимы течения газа. Также необходимо рассмотреть, как изменяется энтропия, а следовательно, и теплоемкость в дозвуковых режимах течения газа в канале.

Всякий политропный процесс расширения газа в канале начинается с точки 0 и заканчивается в пределе критическими параметрами, которые получаются пересечением

энтальпии h_s^* и политропы m (рис. 1). Таким образом, на «вершине» политропных процессов при их расширении «стоят» критические параметры. Критические параметры определяются исключительно показателем политропы $m(j_m)$.

Чтобы определить изменение энтропии в дозвуковом режиме течения газа, необходимо знать, с каких критических параметров он начался, и тем самым знать показатель политропы m и политропный коэффициент скорости j_m , который входит в формулу (5) и остается величиной постоянной при изменении e_a от e_k^* до $e_a = 1,0$.

Тогда формула (5') для определения изменения энтропии в дозвуковом режиме течения газа примет вид

$$\Delta S_a = A \cdot \ln \varepsilon_a, \quad (6)$$

где $A = R \cdot (\varphi_m^2 - 1) = \text{const}$ при изменении e_a от e_k^* до $e_a = 1,0$.

Методика нахождения табличного значения энтропии S_a в дозвуковом режиме течения газа остается прежней. Первый способ – по значению энтальпии h_a и давления P_a . Второй – по значению давления P_a и удельного объема v_a . Эти параметры определяются по формулам

$$P_a = \varepsilon_a \cdot P_0; h_a = h_0 - \frac{C_{Sm}^2}{2}; C_{Sm} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_0 v_0 \left(1 - e_a^{\frac{k-1}{k} j_m^2} \right)}; v_a = \frac{v_0}{e_a^{1/m}}.$$

По этим параметрам находим табличное значение энтропии, по формуле (6) – ее изменение, а затем – расчетное значение из выражения $S_{\text{расч}} = S_0 + \Delta S_a$. Погрешность в определении энтропии в дозвуковом режиме расчетным путем при сравнении с табличным значением не превышает 1 %.

При дозвуковых режимах течения газа мы все время перемещаемся по политропе $P_a v_a^m = \text{const}$ вверх от точки k до точки 0 (см. рис. 1), и изменение энтропии в политропном дозвуковом процессе однозначно определяется изменением относительного противодавления e_a за каналом.

Для иллюстрации вышеизложенного на графике рис. 2 показано изменение энтропии как в критическом (кривая 1), так и в дозвуковом режиме (кривая 2).

Для построения этого графика были выбраны следующие параметры пара: $P_0 = 10$ МПа, $S_0 = 1771,69 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ккал/(кг·град.), $h_0 = 806,1$ ккал/(кг·град.), $t_0 = 500$ °С.

Критическое отношение давлений: $e_k^* = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$.

Дозвуковое отношение давлений: $e_a = 0,1 \dots 1,0$.

На этот же график нанесены соответствующие табличные данные работы [3].

Совпадение расчетных и табличных значений хорошее, погрешность составляет не более 1 %.

Как известно, изменение энтропии ΔS связано с подводом или отводом теплоты в термодинамическом процессе. Поскольку мы рассматриваем канал адиабатный, то подвод или отвод теплоты от внешнего источника равен нулю. В адиабатном канале изменение энтропии может быть только за счет внутреннего подвода теплоты, то есть за счет

теплоты трения, которая образуется при расширении газового потока. Рассчитаем теплоту трения в адиабатном канале при политропном расширении. Этот расчет осуществляется по формуле [1].

$$q_{\Delta S} = C_m(T_a - T_0); \quad q_{\Delta S} = \Delta S \cdot T_{cp}, \quad (7)$$

где $T_{cp} = \frac{T_a - T_0}{\ln T_a/T_0}$ – среднеинтегральная температура.

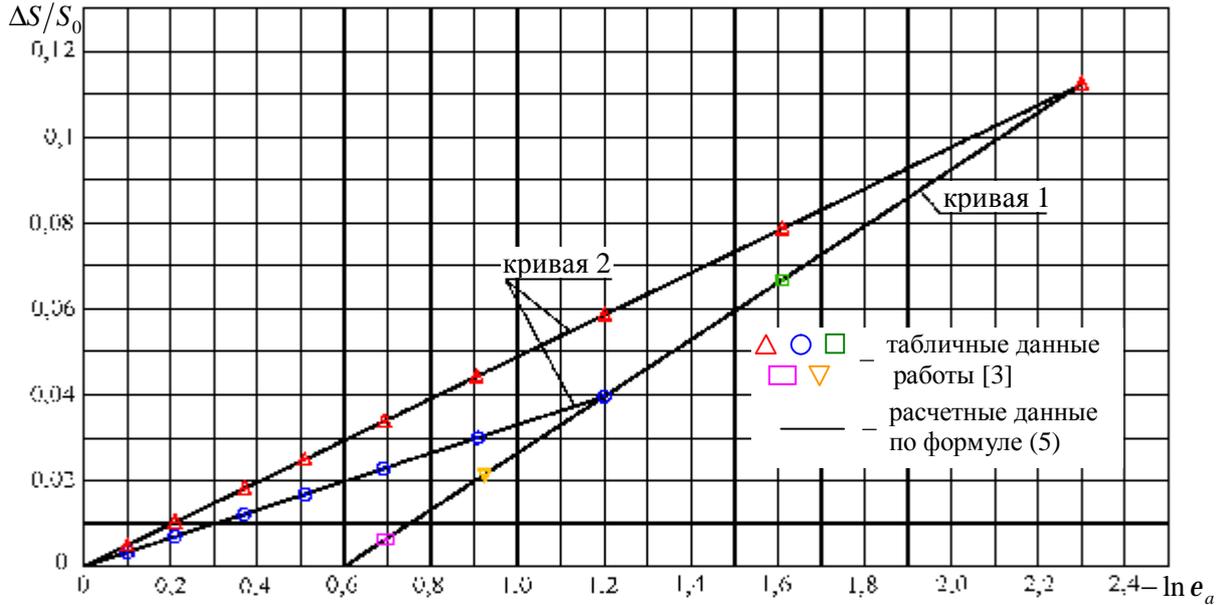


Рис. 2. Изменение энтропии перегретого пара при его расширении в адиабатном канале:

$$P_0 = 10 \text{ МПа}, \quad t_0 = 500^\circ\text{С}, \quad S_0 = 771,69 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad \text{ккал/кг}\cdot\text{град.} \quad e_k^* = 0,1\dots 0,5, \quad e_a = 0,1\dots 1,0.$$

Располагаемая кинетическая энергия газового потока при политропном расширении с показателем политропы «*m*» равна

$$q_m = \frac{C_m^2}{2} = \frac{m}{m-1} P_0 v_0 \left(1 - e_a^{\frac{m-1}{m}} \right). \quad (8)$$

Отношение теплоты трения $q_{\Delta S}$ к располагаемой кинетической энергии потока будет равно

$$\frac{q_{\Delta S}}{q_m} = 1 - j_m^2. \quad (9)$$

Это отношение есть величина постоянная как в критическом, так и в дозвуковом режиме течения газа в канале. Формула (9) выражает относительную долю кинетической энергии потока, которая преобразовалась в теплоту за счет трения в канале. Формула (9) хороша тем, что, зная кинетическую энергию потока (формула (8)), можно всегда определить потери энергии на трение $q_{\Delta S} = (1 - j_m^2) q_m$.

Выводы

1. Получена формула определения теплоемкости в газовом потоке в зависимости от поля скоростей в канале.

2. Следствием вывода формулы теплоемкости в газовом потоке появилась возможность определения термодинамического параметра состояния (энтропии) аналитическим путем.

3. Отношение теплоты трения в газовом потоке к располагаемой кинетической энергии потока есть величина постоянная как в критическом, так и в дозвуковом режимах.

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТІ РЕАЛЬНОГО ГАЗОВОГО ПОТОКУ

В.І. Сиваков, І.В. Сиваков, Ю.В. Браславський

Отримана аналітична формула теплоємності реального (в'язкого) газового потоку, дано її експериментальне підтвердження.

CALCULATION of the REAL GAS FLOW HEAT THERMAL CAPACITY

V. Sivakov, I. Sivakov, Yu. Braslavskiy

An analytic formula of the real (viscous) gas flow heat thermal capacity was derived. Its experimental verification was given.

Список использованных источников

1. *Ястржембский А.С.* Техническая термодинамика / А.С. Ястржембский. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 496 с.

2. *Сиваков В.И.* Определение критических параметров газового потока / В.И. Сиваков, И.В. Сиваков, Ю.В. Браславский // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2012. – Вып. 1 (41). – С. 154 – 161.

3. *Вукалович М.П.* Термодинамические свойства воды и водяного пара / М.П. Вукалович. – М.: Машиностроение, 1967. – 160 с.

Надійшла до редакції 6.11.2013 р.