

### 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. Сиваков<sup>1</sup>, инж., И.В. Сиваков<sup>2</sup>, инж., Ю.В. Браславский<sup>1</sup>, к.т.н.**

<sup>1</sup>Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

<sup>2</sup>АО «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.

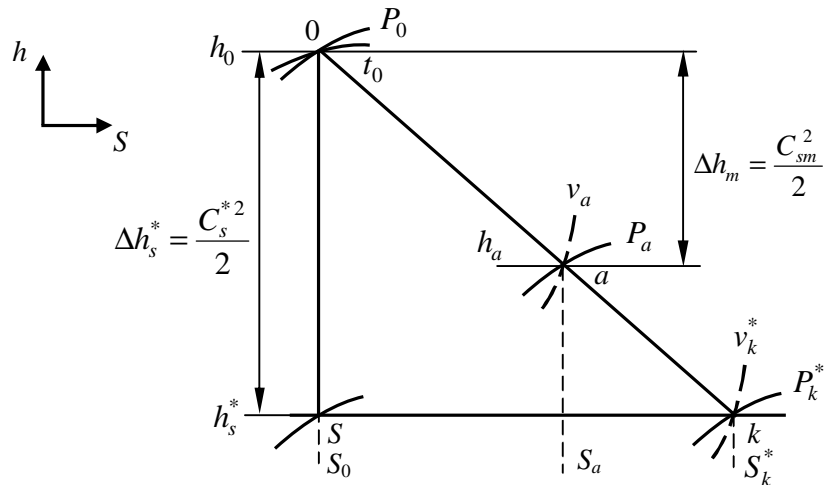


Рис. 1. Схема расширения перегретого пара в диаграмме  $h, S$

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  $\Delta S$ , 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

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

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  $\Delta S$  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.

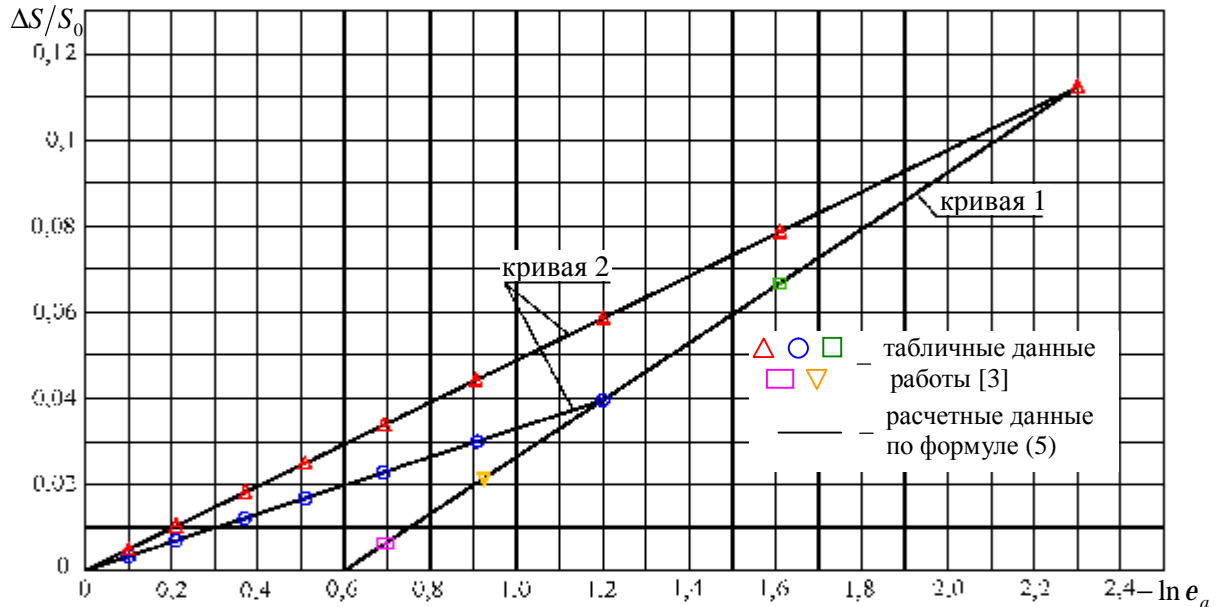


Рис. 2. Изменение энтропии перегретого пара при его расширении в адиабатном канале:

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

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.