

Газодинамический подход к оценке потерь на теплоотдачу в простом газопроводе

А.В.Кулагин

Рассмотрим установившийся режим течения газа по некоторому газопроводу, представляющему собой обычную цилиндрическую трубу. Будем считать, что условия о равномерном распределении основных параметров газа в любом поперечном сечении такой трубы выполнены. Следует также отметить, что речь идет о термодинамической системе, в которой скорость движения газа будет дозвуковой. Работа газов при расширении при течении по такому газопроводу определяется уравнением [1-7]

$$\tau = \frac{f\omega\psi}{\theta} \left(1 - \frac{T'}{T_1}\right), \quad (1)$$

где T_1 - температура взрывчатого разложения, T' - температура газов в данный момент времени с учетом потерь на теплоотдачу, θ - поправочный коэффициент, который определяется в экспериментальных условиях.

Уравнение состояния для $\omega\psi$ килограмма газа с учетом потерь на теплоотдачу определится зависимостью [1,2,4-7]

$$p'(W' - \alpha)\psi\omega = RT'\psi\omega$$

Свободный объем можно рассчитать по формуле

$$(W' - \alpha)\psi\omega = S(l_\psi + l'), \quad (2)$$

где ψ - относительная толщина сгораемого продукта, ω - вес рабочей смеси в результате горения продукта, l_ψ - рабочая длина при движении

продукта по газопроводу, l' - длина газопровода в данный момент времени, R - универсальная газовая постоянная, W' - поправка на коволюм α .

В результате получаем зависимость $p'S(l_\psi + l') = RT'\omega\psi$, в которой сила при сгорании рабочего продукта составит $f \cong RT_1$, тогда отношение температур представить следующей зависимостью

$$\frac{T'}{T_1} = \frac{p'S(l_\psi + l')}{f\omega\psi}$$

Подставим это соотношение в уравнение работы (1), которое примет следующий вид

$$\tau = \frac{f\omega\psi}{\theta} \frac{p'S(l_\psi + l')}{f\omega\psi} \quad (3)$$

И соответственно правая часть числителя уравнения (3) выглядит так $p'S(l_\psi + l') = f\omega\psi - \theta\tau$.

Полная работа продукта составит $\tau = \frac{\varphi q V^2}{2g} + \tau_n$, где φ - коэффициент учета второстепенных работ, q - вес продукта, V - скорость движения продукта, τ_n - часть работы, связанная с потерями на тепло, p' - давление газов в данный момент времени, g - ускорение свободного падения.

Определим работу $\tau_n = \frac{f\omega\psi}{\theta} \frac{\Delta T}{T} \frac{T}{T'} \frac{T'}{T_1}$; подставив уравнение отношения температур, получим $\tau_n = \frac{p'S(l_\psi + l')}{\theta} \frac{\Delta T}{T} \frac{T}{T'}$, $\frac{\Delta T}{T} = N_\eta$, тогда система уравнений в развернутом виде выглядит следующим образом:

$$\tau_n = \frac{p'S(l_\psi + l')}{\theta} \frac{N_\eta}{1 - N_\eta};$$

$$\tau = \frac{\varphi q V'^2}{2g} + \frac{p' S(l_\psi + l')}{\theta} \frac{N_\eta}{1 - N_\eta}; \quad (4)$$

$$\theta \tau = \frac{\theta \varphi q V'^2}{2g} + \frac{p' S(l_\psi + l')}{\theta} \frac{N_\eta}{1 - N_\eta}$$

Подставим $\theta \tau$ из уравнений (3) в систему уравнений (4) имеем такие соотношения:

$$p' S(l_\psi + l') = f \omega \psi + \frac{\theta \varphi q V'^2}{2g} + \frac{p' S(l_\psi + l')}{\theta} \frac{N_\eta}{1 - N_\eta};$$

$$p' S(l_\psi + l') \left(1 - \frac{N_\eta}{1 - N_\eta}\right) = f \omega \psi + \frac{\theta \varphi q V'^2}{2g};$$

$$p' S(l_\psi + l') = (1 - N_\eta) \left(f \omega \psi + \frac{\theta \varphi q V'^2}{2g}\right)$$

Устанавливаем связь между давлениями p' и p для равных весовых количеств газа.

Полученное выше последнее уравнение с учетом формулы (3) расписываем так

$$p' S(l_\psi + l') = RT' \omega \psi$$

Для давления p' имеем

$$p' = \frac{RT' \omega \psi}{l_\psi + l'}$$

Подобное соотношение представим и для давления p

$$p = \frac{RT\omega\psi}{l_\psi + l}$$

Разделив почленно эти уравнения и помня, что $T' = T - \Delta T$, получим:

$$p'(l_\psi + l') = (1 - N_\eta) \frac{l_\psi + l}{l_\psi + l'} p;$$

$$\frac{\Delta T}{T} = N_\eta; \quad \frac{\Delta T}{T} \% = \frac{C_M}{7.774} \frac{\sum_0}{\omega} \frac{1}{\Delta} \eta;$$

$$\eta = l_0(V_0' + V) + a_0 b_0 \left(\ln \frac{1}{1 - \frac{V}{a_0}} - \frac{V}{a_0} \right);$$

$$\frac{\sum_0}{\omega} = \frac{4}{d_{кан}} + \frac{2}{l_{кан}} (cM^2 / cM^3);$$

$$d_{кан} = d\sqrt{\chi}; \quad l_{кан} = \frac{l_0}{\chi};$$

$$a_0 = \frac{27}{16\eta_0} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{32}{27}\eta_0} \right) V_0';$$

$$b_0 = \left(\frac{a_0}{V_0'} - 1 \right) l_0; \quad \eta_0 = \frac{\varphi q V_0'^2}{2gSl_0 p_m};$$

$$V_0' = \frac{SI_0 g}{\varphi q}; \quad V_k = \frac{Sg}{\varphi q} I_k (1 - z_0)$$

В этих зависимостях коэффициент C_M берется по величине сгораемой части толщины продукта $2e_1$, η и η_0 - коэффициенты местных потерь на входе и на выходе, параметры с символом «0» - приведенные коэффициенты, либо соответствующие процессу, $l_{\text{кан}}$ и l_0 - длина канала газопровода и его полная длина, χ - относительная длина газопровода.

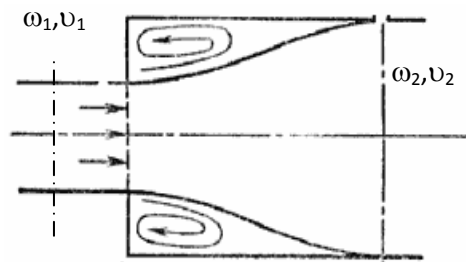


Рис. 1. Потеря давления газа

Решая эту задачу можно учесть и потерю давления при внезапном расширении трубопровода (рисунок 1), которое определяется по формуле Борда [4]

$$\Delta P_{\text{вр}} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2},$$

где V_1 и V_2 – скорости соответственно до и после расширения рабочего продукта. При этом постановку задачи и само решение задачи придется несколько изменить, введя некоторые дополнительные условия.

Представленный газодинамический подход, выраженный системой уравнений рабочего процесса газа с учетом теплоотдачи в простом газопроводе, можно рекомендовать в качестве базовой. Для решения более сложных задач, например по исследованию ресурса, изгибной жесткости трубы или ее перегрузки внутренним давлением газа в виде скачка уплотнения, исследования физико-механических характеристик самого газа, изменения продольных и поперечных геометрических размеров газопровода [8-10], необходима экспериментальная проверка.

Литература:

1. Юдаев Б.Н. Теплопередача [Текст] - М.: Высшая школа, 1973-360 с.
2. Дейч М.Е. Техническая газодинамика [Текст] - М.: Энергия, 1974- 592 с.
3. Falkovich G. Fluid Mechanics, a short course for physicists. [English]. Cambridge University Press, 2011-180 p.
4. Черный Г.Г. Газовая динамика [Текст] - М.: Наука, 1988- 424 с.
Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика [Текст] - М.: Наука, 1976- 888 с.

5. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи [Текст] - М.: Энергия, 1977- 344 с.
6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] - М.: Дрофа, 2003- 840 с.
7. Chandler D. Introduction to modern statistical mechanics. [English]. Oxford university press, 1987-286 p.
8. Кулагин А.В. Предварительная оценка теплоотдачи труб сложной конфигурации. [Электронный ресурс]// «Инженерный вестник Дона», 2012, №1. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/637> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
9. Кулагин А.В. Дородов П.В.. О запасе прочности и оценке надежности узлов металлоконструкций. [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, №2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/810> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.