

5. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч.П. М.:Физматгиз, 1963.- 728 с.

6. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М.:Машиностроение, 1969.- 184 с.

7. Hilsch R. Die Expansion von Gasen in Zentrifugalfeld als Kaeltenprozess; Zeitschrift für Naturforschung, Jan. 1946 - S203 208.

УДК 533.697.3

В.И.Славин

РАДИАЛЬНАЯ ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ ПОЛЕМ ДАВЛЕНИЯ -
ОСНОВНАЯ ПРИЧИНА ТЕПЛООВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ
ПОТОКА ГАЗА В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Условные обозначения: λ - коэффициент теплопроводности, Вт·м/град; ζ - коэффициент пропорциональности при передаче тепла давлением, Вт·м/Па; h - высота сопла, м; c_p - теплоемкость газа при $p=const$, Дж/м³·град; R - универсальная газовая постоянная, Па·м³/град. Индексы: с - пристеночный слой газового потока; вх - питающая емкость; гр - внутренняя граница потока; ос - ось трубы.

В работе развито представление Ж.Ранка, утверждавшего (1931г.), что основной причиной эффекта является передача энергии полем центробежных сил (п.ц.с.) [1; 2]. Изучается идеальный газ в прямой трубе, пренебрегается теплопередачей через стенку. В обычной записи уравнение переноса энергии для зоны сформированного потока ($v_z = 0, v_r = v_\theta$) [3]

$$\frac{d}{dz} (z \vec{q}) = 0, \quad (\vec{q} = -\lambda dT/dz) \quad (1)$$

Однако поток тепла может зависеть не только от ∇T , но и от ∇p : при этом должно выполняться условие: $\nabla T \cdot \nabla p > 0$ [4]. В вихревой трубе оно удовлетворяется автоматически: $\nabla p > 0$ (п.ц.с.), $\nabla T > 0$, так как T убывает с ростом v_θ , что является следствием закона Бернулли для элементарной струйки, а v_z - с ростом

z . Поэтому, заменяя в уравнении (1) $(-\rho dT/dz)$ на $(-\rho dT/dz + \rho dp/dz)$ и пренебрегая теплопроводностью [3], имеем ($\lambda = 0$)

$$\eta z dp/dz = 0. \quad (2)$$

Из системы уравнений (2) и движения

$$dp/dz = \rho v^2/z \quad (3)$$

следует, что в сформированном газовом потоке имеет место постоянство кинетической энергии газа вдоль радиуса (Дж/м^3):

$$\rho(z)v^2(z)/2 = \rho_c v_c^2/2 = \rho_{rp} v_{rp}^2/2 = \text{const}. \quad (4)$$

Математическая модель включает также уравнение состояния

$$T = p/R\rho. \quad (5)$$

уравнения постоянства момента количества движения для струйки газа:

$$vz = v_c z_c = v_{rp} z_{rp}. \quad (6)$$

Условие равенства массового расхода и потока полной энергии в сопле и в произвольном сечении трубы совместно с уравнением состояния идеального газа и соотношениями, связывающими параметры газа в сопле и питающей емкости, а также с граничными условиями

$$v|z=z_{rp} = 0, \quad p|z=z_{rp} = p_{oc} \quad (7)$$

позволяют выразить ρ_c и v_c через T_{BX}^{\otimes} ($T_{BX}^{\otimes} = T_{BX}$, так как $v_{BX} = 0$; обозначено $L = \ln(z_{rp}/z_c)$).

$$\rho_c = p_{oc} L^2 c_0 / [RT_{BX}^{\otimes} (2c_p B + BR - L^2 c_p - RL)], \quad (8)$$

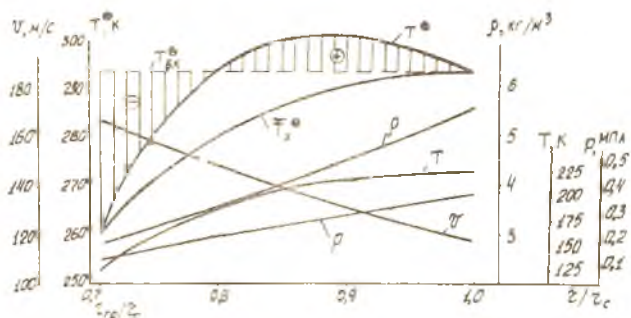
$$v_c^2 = (2c_p / \rho_c) [(R\rho_c T_{BX}^{\otimes} - p_{oc}) / (2c_p L - R)]. \quad (9)$$

При этом интеграл уравнения движения (3) имеет вид ($B = B/z_c$)

$$p = p_{oc} - \rho_c v_c^2 \ln(z/B z_c). \quad (10)$$

Из модели следует, что каждой паре T_{BX}^{\oplus} и B соответствует свои ε и P_{BX} ; наличие расчетных режимов установлено и экспериментально [1]. Наоборот, заданным T_{BX}^{\oplus} и P_{BX} отвечает единственное значение B . В таблице представлены результаты расчета на ЭВМ, выполненного М.В.Славиной, значений граничных параметров потока как функций B при $T_{BX}^{\oplus} = 293$ К, а на рисунке показаны расчетные зависимости от ε переменных ρ , T , σ , ρ , T^{\oplus} , равной $(T + \sigma^2/2c_p)$ и среднеинтегральной холодного потока T_X^{\oplus} при том же значении T_{BX}^{\oplus} и $B = 0,25$:

B , безд.	ρ , МПа	σ_c , м/с	ρ_c , кг/м ³	T , К	ρ , МПа	$\varepsilon_{гр}/\sigma_c$, безд.	$\sigma_{гр}$, м/с	$T_{гр}$, К	$T_{гр}^{\oplus}$, К
0,05	0,365	129	1,72	211	0,116	0,949	136	202	292,4
0,15	0,494	124	2,74	218	0,175	0,837	148	178	285,5
0,25	0,917	117	5,52	225	0,364	0,707	166	124	259,4
0,30	1,98	114	12,6	229	0,840	0,633	180	68,2	227,2
0,33	II, I	III	72,5	232	4,93	0,583	191	13,8	192,7
0,335	6I, 8	110	405	233	27,6	0,574	193	2,55	185,3



Р и с. Расчетные зависимости от ε переменных ρ , T , σ , ρ , T^{\oplus} и среднеинтегральной холодного потока T_X^{\oplus} при том же значении T_{BX}^{\oplus} и $B = 0,25$

Установлено, что T^{\oplus} изменяется с ε (см. рис.), что свидетельствует о наличии эффекта энергоразделения; расчетные ρ_c и ρ_{BX} при $T_{BX}^{\oplus} = const$ возрастают с B , причем скорость роста непрерывно увеличивается, что отвечает данным [1]; при $B > 0,335$ не

существует устойчивых режимов работы ТВ; максимум ($T_{вх}^{\circ} - T_{гр}^{\circ}$) равен 50,5 К без учета фазового перехода, а максимум ($T_c - T_{гр}$) равен 144 К (при $p = 0,55$ МПа); средний прирост $\Delta T / \Delta p$ равен 85 К/МПа, что соответствует экспериментам; при $B > 0,3$ $v_{гр}$ превышает скорость звука, что приводит к нежелательным скачкам плотности; максимум $T^{\circ}(z)$ расположен на расстоянии $\sim 0,3$ ширины потока от стенки трубы, а зона охлажденного газа занимает $\sim 0,3$ ширины от оси; $\nabla T > 0$ и $\nabla p > 0$ (см. рис.), что подтверждает принятое допущение; T_x° практически пропорциональна $T_{вх}^{\circ}$ (при $B = 0,25$ ($T_{вх}^{\circ} - T_{гр}^{\circ}$) равно 22,1 К при $T_{вх}^{\circ} = 214$ К и 45,1 К при $T_{вх}^{\circ} = 393$ К), что отвечает данным эксперимента [5]; эффективность процесса не зависит от химического состава газа, что отвечает данным, за исключением H_2 и He ; последнее, возможно, связано с утечкой наружных слоев этих газов через микropоры в стенке трубы, приводящей к расширению внутренних и потому усиливающей эффект энергоразделения [2]; аналогичный результат получают с помощью охлаждающей рубашки [1]. Добавим, что переход от прямоточной вихревой трубы к противоточной приводит, согласно оценочному расчету, к росту эффекта энергоразделения на 15-25 %.

Библиографический список

1. Суслов А.Д., Иванов С.В., Мурашкин А.В. и др. Вихревые аппараты. М.: Машиностроение. 1985.-190 с.
2. Алексеев Т.С. О природе эффекта Ранка//ИФЖ. 1964. №4. С. 121-130.
3. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Машиностроение. 1963.-183 с.
4. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Механика сплошных сред//ГИТТЛ. 1954.-795 с.
5. Бродянский В.М., Лейтес И.А. О градиенте температур в трубке Ранка-Хилша//ИФЖ. 1960. № 12. С. 25.