

3. Дыскин Л.М., Крамаренко П.Т. О зависимости температурной характеристики от длины вихревой трубы. - В сб.: Вихревой эффект и его применение в технике. - Куйбышев: КуАИ, 1976.

УДК 66.074.38

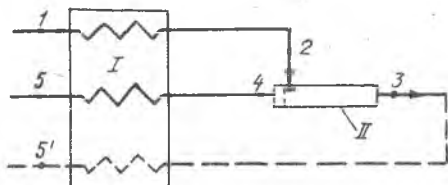
И.Л.Лейтес, М.А.Жидков

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВИХРЕВОГО ЭФФЕКТА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССАХ

Термодинамическая эффективность вихревого эффекта значительно выше, чем эффекта Джоуля-Томсона [1, 2]. Следовательно, ВТ могла бы найти применение в тех криогенных системах, в которых используется эффект дросселирования. Однако и в этом случае возникают трудности.

Как известно, количество холода, произведенного в ВТ дополнительно к эффекту Джоуля-Томсона, равно количеству тепла, отводимого с горячим потоком. Для адиабатной трубы справедливо уравнение

$$i_2 = \mu i_4 + (1 - \mu) i_3, \quad (I)$$



Р и с. I. Регенеративная схема с ВТ: I - теплообменник, II - ВТ (пунктир - вариант схемы с регенерацией холода горячего потока)

т.е. сумма энтальпий горячего и холодного потоков равна энтальпии исходного потока. В регенеративном цикле (рис. I) при $T_3 = T_0$ дополнительная холодопроизводительность ВТ равна нулю. Если же $T_3 < T_0$, то эта величина отрицательна вследствие потерь холода с горячим потоком. В криогенных схемах, как правило,

$T_3 < T_0$, поэтому необходима рекуперация холода горячего потока (рис. I), но тогда вихревой эффект не имеет преимуществ перед

эффектом Джоуля-Томсона, так как общая холодопроизводительность ВТ в этом случае равна холодопроизводительности изотермического дроссель-эффекта.

На основании этого некоторыми исследователями сделан вывод, что применение ВТ в подобных циклах нецелесообразно [3]. Однако можно показать, что этот вывод справедлив лишь в частных случаях и эффективность вихревого эффекта всегда выше эффективности процесса дросселирования, а термодинамическая эффективность криогенных систем с ВТ во многих случаях выше, чем систем с дросселем.

Как видно из рис. 2, в точку 6 можно прийти двумя путями: либо сразу после дросселирования, либо сначала расширив газ в ВТ, смешав затем горячий и холодный потоки. Таким образом, потери эксергии при дросселировании равны сумме потерь в ВТ и потерь при смешении холодного и горячего потоков:

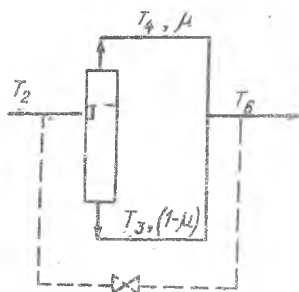
$$d_{\text{эп}} = d_{\text{вихр}} + d_{\text{см}} \quad (2)$$

Следовательно, сумма эксергий горячего и холодного потоков всегда выше эксергии газа после обычного дросселирования на величину, равную потерям при смешении:

$$d_{\text{см}} = T_0 \Delta S = T_0 C_p \left[\mu \ln \frac{T_6}{T_4} + (1-\mu) \ln \frac{T_3}{T_6} \right] \quad (3)$$

Это означает, что в случаях, когда играет роль не только количество холода, но и его качество, термодинамическая эффективность вихревого эффекта всегда выше эффекта Джоуля-Томсона. Соответственно эксергетический к.п.д. ВТ $\eta_e^{\text{вихр}}$ всегда выше эксергетического к.п.д. дросселя $\eta_e^{\text{др}}$.

В качестве примера можно сопоставить эксергетические к.п.д. двух способов получения холода при работе на природном газе по данным [4, 5]. При работе ВТ на $\mu = 0,77$; $\eta_e^{\text{вихр}} = 6,4$; $\eta_e^{\text{др}} = 4,4$. При этом принималось, что температура и давление на входе в расширительные устройства, а также холодопроизводительности одинаковы. Температура холодного потока T_4 ниже, а температура



Р и с. 2. Схема эквивалентных процессов расширения газа

горячего потока T_3 выше, чем температура после дросселирования.

Эксергетический к.п.д. для ВТ рассчитывали по формуле

$$\eta_e^{вхр} = \frac{\Delta l_T}{\Delta l_p} = \frac{\mu(l_{T4} - l_{T2}) + (1-\mu)(l_{T3} - l_{T2})}{\mu(l_{p2} - l_{p4}) + (1-\mu)(l_{p2} - l_{p3})}, \quad (4)$$

где в числителе - изменение термической эксергии холодного и горячего потоков, возникающее вследствие температурного расслоения газа в ВТ, а в знаменателе - убыль эксергии, зависящая от уменьшения давления расширяемого газа.

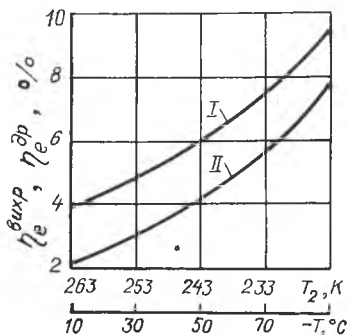
Эксергетический к.п.д. для дросселя имеет аналогичный вид:

$$\eta_e^{\partial p} = \frac{\Delta l_T}{\Delta l_p} = \frac{l_{T4}^{\partial p} - l_{T2}}{l_{p2} - l_{p4}}. \quad (5)$$

В формулах (4) и (5) из [6]

$$l_T = C_p \int_T^{T_0} \frac{T - T_0}{T} dT. \quad (6)$$

$$l_p = T_0 (S - S_0) - \Delta i_T^0. \quad (7)$$



Р и с. 3. Зависимость эксергетических к.п.д. ВТ и дросселя от температуры на входе T_2 : I - стальная труба; II - дроссель

Результаты расчетов эксергетических к.п.д. показаны на рис. 3. Как видно из рисунка, во всем интервале температур T_2 эксергетический к.п.д. ВТ больше эксергетического к.п.д. дросселя, хотя холодопроизводительность обоих устройств одинакова.

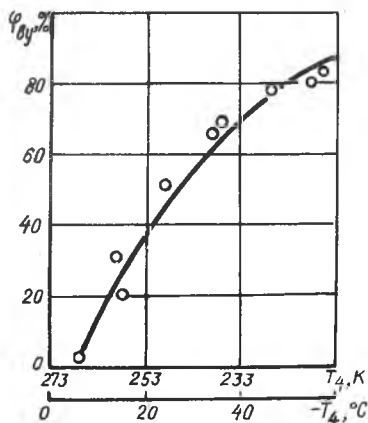
Таким образом, существует теоретическая возможность эффективного использования ВТ в низкотемпературных регенеративных циклах даже при $T_3 < T_0$.

Положительный эффект может быть достигнут в том случае, если более высокое качество получаемого холода использовать для проведения

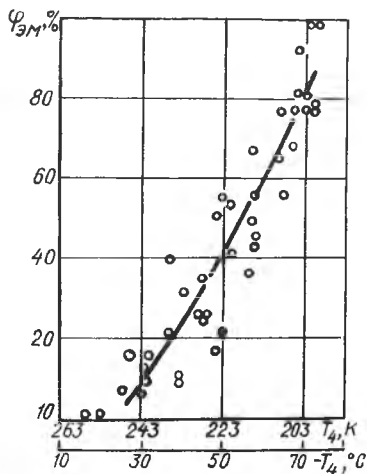
полезной работы, которая не может быть получена на другом температурном уровне.

Эффективное использование избыточной термической эксергии дает процесс низкотемпературной очистки природного газа от высших углеводородов и сернистых соединений, необходимый для ряда химических производств [4, 5]. Природный газ поступал в теплообменник, где охлаждался холодным потоком и шел в ВТ. Конденсирующиеся примеси отделялись в сепараторах. Горячий поток после ВТ смешивался с потоком, выходящим из теплообменника. ВТ могла работать как обычный дроссель при $\mu = 1$.

На рис. 4 и 5 представлены экспериментальные данные, полученные на опытно-промышленной установке, в виде зависимостей степени очистки природного газа от высших углеводородов $\varphi_{ВУ}$ и степени очистки от этилмеркаптана $\varphi_{ЭМ}$ от температуры холодного потока T_4 . Как видно из графиков, степень очистки природного газа от примесей сильно зависит от температуры.



Р и с. 4. Степень очистки природного газа от высших углеводородов как функция температуры холодного потока



Р и с. 5. Степень очистки природного газа от этилмеркаптана как функция температуры холодного потока

Степень извлечения высших углеводородов из холодного потока заметно выше, когда используется ВТ. Качественно другая картина на-

блюдается при очистке от этилмеркаптана. При дросселировании эта примесь практически не извлекается, а при использовании ВТ достигается значительная степень очистки как холодного потока, так и общего потока газа.

Л и т е р а т у р а

1. Б р о д я н с к и й В.М., Л е й т е с И.Л. и др. - Химическая промышленность. 1963, № 4.
2. М а р т ы н о в А.В. Исследование эффекта Ранка-Хилша в адиабатных и неадиабатных условиях. Дис. на соиск. уч. степ. к.т.н. М., 1964.
3. М е р к у л о в А.П., К о л ы ш е в Н.Д. Труды КуАИ, вып. XII, 1961, 275 с.
4. Л е й т е с И.Л., С е м е н о в В.П. и др. - В кн.: Некоторые вопросы исследования вихревого эффекта и его промышленного применения. - Куйбышев, 1974, 85 с.
5. Ж и д к о в М.А., Л е й т е с И.Л. и др. - Газовая промышленность, 1974, № 6, 43 с.
6. Б р о д я н с к и й В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. - М.: Энергия, 1973.

УДК 532.527

В.Г.Воронин, С.В.Иванов, Ю.В.Чижиков

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ ПРИ РАБОТЕ НА ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СМЕСИ

Развитие исследования вихревого эффекта привело к созданию вихревых аппаратов, в которых рабочим телом является не только однофазная среда, но и двухфазные (газожидкостные) смеси.

Одной из важных характеристик таких аппаратов является эффективность сепарации. Так, например, в вихревых сепараторах эта характеристика определяет работоспособность устройства, а в вихревых ректификаторах степень сепарации влияет на чистоту получаемых продуктов.