

М. В. Лурье

M. V. Lurie

Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина, г. Москва

*Ключевые слова: природный газ, реальный газ, компримирование, нагнетатель, адиабатический процесс, политропический процесс**Key words: natural gas, real gas, compression, injector, adiabatic process, polytropic process*

Принято считать, что компримирование природного газа в центробежных нагнетателях компрессорных станций (КС) имеет политропический характер, причем индекс политропической зависимости отличается от показателя адиабаты. Последнее обстоятельство объясняется, как правило, наличием теплообмена газа с нагнетательным оборудованием и необратимостью происходящих процессов. В настоящей работе утверждается, что это объяснение в общем случае неверно. На самом деле указанное отличие обусловлено проявлением реальных свойств газа. Показано, что если сжатие газа в центробежных нагнетателях КС рассматривать как адиабатический процесс, но учитывать при этом реальные свойства газа, то получаются результаты, очень близкие к наблюдаемым. В то же время влияние необратимости и теплообмена газа с окружающим оборудованием играет гораздо меньшую роль, чем считалось ранее.

Формулировка вопроса. Известно, что при сжатии природного газа центробежными нагнетателями КС температура газа увеличивается. Поскольку сжатие происходит достаточно быстро, то теплообменом газа с окружающим оборудованием можно пренебречь, а сам процесс считать адиабатическим процессом. Будь природный газ совершенным, связь между плотностью ρ_n и температурой T_n газа в линии нагнетания, плотностью ρ_v и температурой T_v в линии всасывания и степенью $\varepsilon_{сж} = p_n/p_v$ сжатия газа выражалась бы классическими соотношениями адиабаты Пуассона

$$\frac{\rho_n}{\rho_v} = \left(\frac{p_n}{p_v} \right)^k, \quad \frac{T_n}{T_v} = \left(\frac{p_n}{p_v} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (1)$$

в которых $k = C_p/C_v$ — показатель адиабаты; C_p, C_v — теплоемкости газа при постоянном давлении и объеме, причем справедлива формула Майера $C_p - C_v = R$, где R — газовая постоянная. Однако практика показывает, что при сжатии природного газа в промышленных нагнетателях соотношения (1) не имеют место, поэтому в инженерных расчетах процесс сжатия природного газа в нагнетателях считают политропическим:

$$\frac{\rho_n}{\rho_v} = \left(\frac{p_n}{p_v} \right)^m, \quad \frac{T_n}{T_v} = \left(\frac{p_n}{p_v} \right)^{\frac{m-1}{m}}, \quad (2)$$

где m — показатель (индекс) политропы. Соотношения (2) весьма схожи с соотношениями (1), однако в отличие от показателя k адиабаты в них присутствует другой показатель m , отличающийся от k , как правило, в большую сторону:

$m > k$. Вот почему для практических расчетов в формулу изменения температуры обычно вводят корректирующий коэффициент $\eta_{пол.}$:

$$\frac{T_H}{T_6} = \left(\frac{p_H}{p_6} \right)^{\frac{k-1}{\eta_{пол.} \cdot k}},$$

причем замечено, что $\eta_{пол.}$ зависит от начальных значений T_6 и p_6 . Для коэффициента $\eta_{пол.}$ существуют различные эмпирические формулы.

Согласно классическим воззрениям, если показатель $m > k$, то процесс сжатия происходит с подводом тепла ($dq^{внеш.} > 0$), если же $m < k$, то процесс сжатия происходит с отбором тепла ($dq^{внеш.} < 0$). Настолько ли справедливо это утверждение, если природный газ, особенно при значительных давлениях, не является совершенным. Поэтому нет оснований считать, что в адиабатическом процессе, происходящем с реальным газом, выполняются соотношения (1). Следовательно, нет оснований считать, что справедливы и известные утверждения о наличии и отсутствии притока или отбора тепла в процессе компримирования газа. Возникает вопрос, какой вид имеет связь начальных и конечных параметров сжатия газа, если газ не рассматривать как совершенный, иными словами, какой вид имеет уравнение адиабаты *реального* газа?

Для ответа на этот вопрос запишем уравнение первого начала термодинамики в *обратном* термодинамическом процессе в случае отсутствия внешнего притока тепла ($dq^{внеш.} = 0$) и пренебрежения изменением удельной кинетической энергии в следующем виде:

$$\underbrace{d\left(v^2/2\right)}_0 + de_{внут.} = \underbrace{dq^{внеш.}}_0 + dA^{внеш.} = 0 \quad - \underbrace{p \cdot d\left(\frac{1}{\rho}\right)}_{dA^{внеш.}}$$

или

$$\underbrace{d\left(e_{внут.} + \frac{p}{\rho}\right)}_{J(p,T)} = \frac{dp}{\rho}. \quad (3)$$

Адиабата совершенного газа. Для совершенного газа (с уравнением состояния $p = \rho RT$) удельная энтальпия J , стоящая в круглых скобках в левой части уравнения, есть функция только от температуры газа: $J(T) = C_v T + RT + const. = C_p T + const.$, поэтому из выражения (3) имеем:

$$dJ = C_p dT = \frac{dp}{\rho} \quad \text{или} \quad C_p dT = \frac{RT}{p} dp \quad (4)$$

и далее

$$\frac{dT}{T} = \frac{R}{C_p} \cdot \frac{dp}{p} \Rightarrow \frac{dT}{T} = \frac{k-1}{k} \cdot \frac{dp}{p}.$$

Проинтегрировав это дифференциальное уравнение с начальными условиями $T = T_6$ при $p = p_6$, получим закон увеличения температуры газа в адиабатическом процессе, то есть вторую формулу (2):

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (5)$$

Адиабата реального газа. Для реального газа удельная энтальпия $J=J(T,p)$ зависит не только от температуры, но и от давления, поэтому из основного уравнения (3) получаем:

$$\underbrace{\left(\frac{\partial J}{\partial T} \right)_p}_{C_p} dT + \underbrace{\left(\frac{\partial J}{\partial p} \right)_T}_{-C_p D_*} dp = \frac{1}{\rho} dp \Rightarrow C_p dT = \left(\frac{1}{\rho} + C_p D_* \right) dp$$

или

$$\frac{dT}{dp} = D_* + \frac{1}{\rho C_p} = \frac{\rho C_p D_* + 1}{\rho C_p}, \quad (6)$$

где $D_* = D_*(p, T)$ — коэффициент Джоуля — Томсона. Сопоставляя уравнение (6) для реального газа с аналогичным уравнением (4) для совершенного газа, видим, что они отличаются наличием в правой части слагаемого D_* . Поскольку $D_* > 0$, то это означает, что при сжатии реального газа имеет место *дополнительное увеличение температуры за счет джоулева нагрева*.

Согласно формулам термодинамики, справедливы следующие равенства [1]:

$$C_p D_* = - \frac{\rho + T(\partial \rho / \partial T)_p}{\rho^2} \Rightarrow \rho C_p D_* + 1 = - \frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p;$$

$$C_p - C_v = - \frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_p,$$

поэтому уравнение (6) адиабатического процесса реального газа приобретает вид

$$\frac{dT}{dp} = \frac{C_p - C_v}{C_p} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_p. \quad (7)$$

Если газ совершенный, то $(\partial T / \partial p)_p = T/p$, поэтому уравнение (7) переходит в уравнение (5) адиабаты совершенного газа. Если же газ реальный, то производная $(\partial T / \partial p)_p \neq T/p$. Ее вычисление (путем дифференцирования уравнения состояния реального газа по p) дает

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_p = \frac{T}{p} \cdot \frac{1 - p/Z \cdot (\partial Z / \partial p)_T}{1 + T/Z \cdot (\partial Z / \partial T)_p},$$

поэтому уравнение адиабаты реального газа имеет вид

$$\frac{dT}{dp} = \frac{C_p - C_v}{C_p} \cdot \frac{T}{p} \cdot \frac{1 - p/Z \cdot (\partial Z / \partial p)_T}{1 + T/Z \cdot (\partial Z / \partial T)_p}. \quad (8)$$

Политропическая аппроксимация адиабаты реального газа. Найти аналитическое решение уравнения (8) не удастся, это можно сделать лишь численным путем. Однако представляет интерес ответ на вопрос, как подобрать некоторое (*кажущееся*) значение $k_{\text{каж.}}$ показателя адиабаты в классической формуле $T = A \cdot p^{(k_{\text{каж.}} - 1)/k_{\text{каж.}}}$ Пуассона, где A — некоторая константа, чтобы зависимость температуры от давления в процессе адиабатического сжатия *реального* газа приближенно описывалась этой формулой, справедливой только для совершенного газа.

Подставив зависимость $T = A \cdot p^{(k_{\text{каж.}} - 1)/k_{\text{каж.}}}$ в уравнение (8), получим

$$\frac{k_{\text{каж.}} - 1}{k_{\text{каж.}}} \cdot A p^{-\frac{1}{k_{\text{каж.}}}} = \frac{C_p - C_v}{C_p} \cdot A p^{-\frac{1}{k_{\text{каж.}}}} \cdot \frac{1 - p/Z \cdot (\partial Z / \partial p)_T}{1 + T/Z \cdot (\partial Z / \partial T)_p}$$

или

$$k_{\text{каж.}} = \frac{C_p}{C_v} \cdot \frac{1 + T/Z \cdot (\partial Z / \partial T)_p}{1 - p/Z \cdot (\partial Z / \partial p)_T}. \quad (9)$$

Для совершенного газа $Z \equiv 1$, поэтому дробь, стоящая в правой части уравнения (9) сомножителем при отношении C_p/C_v , равна 1, следовательно, $k_{\text{каж.}} = k_{\text{сов.}}$, где $k_{\text{сов.}}$ — показатель адиабаты совершенного газа.

Для реального газа показатель $k_{\text{каж.}}$, аппроксимирующий адиабатический процесс, может быть как *больше*, так и *меньше* показателя $k_{\text{сов.}}$ адиабаты Пуассона. Какой вариант имеет место в конкретном случае, зависит от диапазона рассматриваемых температур и давлений, то есть от значений функций $Z(p, T)$ и $C_p(p, T)$. В таблице приведены значения показателя $k_{\text{каж.}}$, рассчитанные согласно уравнению (9) и диаграммам коэффициента $Z(p, T)$ сжимаемости в уравнении состояния метана: $k_{\text{сов.}} \approx 1,306$, $C_v = 1700$ Дж/(кг·К); $R = 520$ Дж/(кг·К).

Кажущееся значение $k_{\text{каж.}}$ показателя адиабаты Пуассона, аппроксимирующей процесс адиабатического сжатия реального газа (метана)

Давление, МПа	Температура, К					
	280	290	300	310	320	330
0,1	1,306	1,306	1,306	1,306	1,306	1,306
5	1,361	1,356	1,352	1,349	1,345	1,342
7	1,373	1,368	1,364	1,360	1,356	1,352
9	1,374	1,372	1,369	1,365	1,362	1,359
10	1,371	1,371	1,369	1,366	1,363	1,360
15	1,331	1,342	1,349	1,353	1,355	1,356
20	1,286	1,302	1,315	1,325	1,332	1,338
25	1,254	1,279	1,285	1,297	1,308	1,316
30	1,235	1,250	1,264	1,277	1,288	1,297

Из приведенной таблицы следует, что $k_{\text{каж.}} > k_{\text{сов.}}$ почти во всем интервале температур и давлений, меньших 15 МПа. Например, если реальный газ сжимают при давлениях $7 \div 9$ МПа, то $k_{\text{каж.}} \approx 1,37$. Однако при сжатии реального газа в интервале давлений $20 \div 25$ МПа показатель $k_{\text{каж.}} \approx 1,28 - 1,32$, то есть близок или даже меньше $k_{\text{сов.}}$.

Таким образом, учет реальных свойств природного газа, рассматриваемого в рамках модели реального газа, то есть газа с уравнением состояния $p = Z(p,T) \cdot pRT$, показывает, что компримирование газа в центробежных нагнетателях КС является процессом, достаточно близким к адиабатическому. В зависимости от диапазона рабочих давлений и температур индекс политропической зависимости, аппроксимирующей адиабатический процесс сжатия реального газа, может быть как больше, так и меньше показателя адиабаты Пуассона совершенного газа. Этот коэффициент может быть рассчитан на основе уравнения состояния транспортируемого газа. Небольшие отклонения рассчитанных коэффициентов от их фактических значений в центробежных нагнетателях КС могут быть связаны с необратимостью происходящих процессов или теплообменом газа с окружающим оборудованием.

Список литературы

1. Кириллин А. В., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. – М.: Энергоатомиздат. – 1983. – 416 с.

Сведения об авторе

Лурье Михаил Владимирович, д. т. н., профессор кафедры «Проектирование и эксплуатация нефтегазопроводов», Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина, г. Москва, тел. 8 (499)2339254, e-mail: lurie254@gubkin.ru

Lurie M. V., Doctor of Technical Sciences, professor of the chair «Designing and operation of oil and gas pipelines» Russia State University of Oil and Gas named after Gubkin I. M., phone: 8(499)2339254, e-mail: lurie254@gubkin.ru

УДК 624.154.1

ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ОПОР ТРУБОПРОВОДА НАДЗЕМНОЙ ПРОКЛАДКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ

«ЗАПОЛЯРЬЕ — НПС «ПУРПЕ»

PREDICTION OF THE GROUNDS TEMPERATURE BEHAVIOR OF THE
SURFACE LAYING PIPELINE SUPPORT FOUNDATIONS FOR ENSURING
THE TROUBLE-FREE OPERATION OF THE PIPELINE SYSTEM
«ZAPOLYARIE — NPS PURPE»

В. В. Павлов, Ю. В. Богатенков, М. Ю. Зотов, А. Н. Петелин
V. V. Pavlov, Yu. V. Bogatenkov, M. Yu. Zotov, A. N. Petelin

ОАО «Гипротрубопровод», ООО «Научно-исследовательский институт транспорта нефти и нефтепродуктов», г. Москва; ОАО «Сибнефтепровод», г. Тюмень

Ключевые слова: **прогнозный теплотехнический расчет, термостабилизатор, многолетнемерзлый грунт**

Key words: **predictable heat engineering calculation, heat stabilizer, permafrost ground**

Строительство и эксплуатация объектов трубопроводного транспорта на территориях распространения многолетнемерзлых грунтов приводит к значительным изменениям геокриологических условий. Развитие негативных геокриологических процессов, влияющих на несущую способность и устойчивость фундаментов, возникает даже при незначительных изменениях теплового баланса в геотехнической системе «атмосфера — сооружение — многолетнемерзлый грунт».