УДК 621.522.3

Э. Ш. Теляков, Т. С. Козырева, Э. В. Осипов,
Э. Б. Мац

АЛГОРИТМЫ УЧЁТА КОНДЕНСАЦИИ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ К ОНДЕНСИРУЕМОГО РАБОЧЕГО ТЕЛА ЧЕРЕЗ АКТИВНОЕ СОПЛО ГАЗОВОГО ЭЖЕКТОРА.

Ключевые слова: газовый эжектор, конденсация газа.

Представлена методика расчёта газового эжектора в составе установки создания вакуума, учитывающая эффект конденсации рабочего тела при его истечении через активное сопло. Для оценки влияния учёта скачка конденсации в активном сопле был проведён расчёт четырёхступенчатого пароэжекторного вакуумного насоса при давлении всасывания 2 торр и показано, что при учете эффекта конденсации производительность насоса изменилась в 1,5 раза.

Keywords: gas ejector, gas condensation.

Presented the method of gas ejector calculation, which take into account condensation effect of working medium, when it expires in active nozzle. To assess the effect excluding of jump condensation in active nozzle the 4th stage steam jet pump with suction pressure 2 torr was calculated. Shown, that if consider the condensation effect, capacity of pump changed in 1.5.

Газовые эжекторы – одно из наиболее распространённых устройств, используемых для создания вакуума в диапазоне остаточных давлений 0.5-100 торр в различных отраслях промышленности. Источником энергии в этих устройствах является активное сопло, через которое подаётся газ повышенного давления. Обычно это водяной пар, но часто (особенно в химической промышленности при использовании жидкостнокольцевых машин с предвключённым эжектором [1-2]) это может быть рабочий продукт или его смесь с воздухом. Величина степени расширения газа в активном сопле составляет 2, 3 и даже 4 порядка. Это расширение сопровождается резким охлаждением потока и конденсацией части газов, входящих в него. Учёт конденсации в активном сопле пароэжекторного насоса (активный газ- водяной пар) обычно производится с использованием I-S диаграммы водяного пара. Для других веществ, а тем более для смеси газов, таких диаграмм нет. Кроме того, с помощью I-S диаграммы процесс конденсации рассчитывается при условии термодинамически равновесного расширении газа, а из экспериментов известно [3], что при течении газов с большими скоростями в расширяющейся части сопла Лаваля равновесный процесс не реализуется. В таких течениях возникает переохлаждение, выражающееся в том, что температура газа оказывается ниже температуры насыщения. Это состояние является устойчивым до определённого предела. При его достижении газ скачком переходит в состояние равновесия (скачёк конденсации) и далее расширяется в условиях термодинамического равновесия.

Совокупность отмеченных особенностей привела к необходимости разработки нового алгоритма расчёта истечения произвольных газов через активное сопло вакуумсоздающего эжектора. Расчёт истечения через критическое сечение сопла проводится по общеизвестным зависимостям и здесь не рассматривается. Результаты этого расчёта: расход газа (m), давление торможения (P^*_0), температура торможения (T^*_0) и состав газа являются исходными данными для дальнейших расчётов. Исходными являются также площадь критического сечения (F_{KP}) и площадь выходного сечения активного сопла (F_C).

Первый этап расчёта связан с определением сечения сопла, в котором происходит скачёк конденсации. Как показали экспериментальные исследования [3], предельное переохлаждение газа, после которого происходит скачёк, зависит от формы канала (градиента скорости вдоль его оси) и начального перегрева газа на входе в сопло относительно состояния термодинамического равновесия:

$$\overline{H} = \frac{h^* - h_S}{h_S}, \qquad (1)$$

где h^* - энтальпия торможения газа на входе в сопло, h_S – энтальпия сухого газа (пара) на линии пересечения изоэнтропы с верхней пограничной кривой. В работе [3] приведены экспериментальные зависимости, позволяющие определить величину числа Маха перед скачком конденсации в зависимости от угла раствора сверхзвуковой части плоского сопла (α_C) и степени перегрева газа. Эти зависимости хорошо аппроксимируются следующим полиномом:

$$M_{CK} = K_M \begin{bmatrix} (0.9801 + 0.04613\alpha_C) + \\ + (1.1031 - 0.07611\alpha_C + \\ + 0.000148233\alpha_C^2)\overline{H} \end{bmatrix}, \qquad (2)$$

где K_M - коэффициент, учитывающий отличие осесимметричного сопла от плоского. Величина этого коэффициента больше единицы, так как в осесимметричном сопле градиент скорости больше, чем в плоском.

Течение газового потока до скачка происходит без конденсации, поэтому параметры потока перед скачком определяются по общепринятым зависимостям газовой динамики по заданной приведённой скорости λ_{CK}, которая, в свою очередь, определяется в зависимости от числа Маха по уравнению

$$\lambda_{CK}^2 = \frac{M_{CK}^2\left((k+1)/2\right)}{1+M_{CK}^2\left((k-1)/2\right)}, \qquad (3)$$

где k – показатель адиабаты. В результате этого расчёта определяются скорость W_1, статическое давление P_1, статическая температура T_1 и площадь сечения потока F_1 перед скачком конденсации.

Расчёт параметров потока после скачка построен на следующих допущениях: а) скачёк конденсации прямой; б) к насыщенному и переохлаждённому пару применимо уравнение состояния Pv = RT; в) конденсация происходит только в скачке конденсации; г) за фронтом скачка влажный пар находится в состоянии термодинамического равновесия; д) скорость жидкой фазы за скачком совпадает по величине и направлению со скоростью основного потока; е) толщина скачка бесконечно мала; ж) объём, занимаемый жидкой фазой, бесконечно мал. Расчёт построен на использовании следующих уравнений, в которых индекс 1 отнесён к параметрам до скачка, а индекс 2 к параметрам после скачка.

Уравнение расхода $m_{2G}=\rho_2 W_2 F_1$. После подстановки вместо $\rho_2=1/v_2$ соответствующего значения из уравнения состояния получается:

$$m_{2G} = \frac{P_2 W_2 F_1}{R_{2G} T_2}, . \qquad (4)$$

где m_{2G}, R_{2G} -расход и газовая постоянная газовой фазы после скачка.

Уравнение импульсов

$$m_1(W_2 - W_1) = (P_1 - P_2)F_1 \qquad (5)$$

Уравнение энергии $h_2^* - h_1^* = 0$, записанное для условий отсутствия теплообмена с внешней средой, отсутствия технической работы, работы трения и перепада пьезометрической высоты. При наличии конденсации в процессе перехода из состояния 1 в состояние 2 имеем $h_2^* = x_2\, h_{2G}^* + (1-x_2)h_{2L}^*$, где:

$x_2 = m_1/m_{2G}$ - степень сухости потока, h_{2G}^*, h_{2L}^* - энтальпии торможения газовой и жидкой фаз. После подстановки значения h_2^* в уравнение энергии получается:

$$h_1 = x_2 h_{2G} + (1-x_2)h_{2L} \qquad (6)$$

Решая (6) относительно x_2 имеем:

$$x_2 = \frac{h_1^* - h_{2L}^*}{h_2^* - h_{2L}^*}. \qquad (7)$$

Если поток состоит из одного индивидуального вещества (моногаз), то $h_{2L}^* = h_2^* - r$, где r – теплота парообразования моногаза. В этом случае уравнение (7) приводится к виду:

$$x_2 = \frac{h_1^* - h_2^* + r}{r}. \qquad (8)$$

Уравнение связи между давлением P_S и температурой насыщения T_S индивидуального вещества

$$\ln P_S = B - \frac{C}{D+T_S}. \qquad (9)$$

Это уравнение Антуана, в котором B,C,D – эмпирические коэффициенты, индивидуальные для каждого вещества, а P_S – давление, выраженное в [тор].

Уравнение связи между энтальпией и энтальпией торможения

$$h_2^* = h_2 + \frac{W_2}{2}. \qquad (10)$$

Уравнение адиабаты [4]

$$S_{02}^* - S_{02} = R_2 \ln\frac{P_2^*}{P_2}, \qquad (11)$$

где $S_0 = \int_0^T \frac{C_P dT}{T}$ - термодинамическая функция, C_P – теплоёмкость газа при постоянном давлении.

После скачка конденсации $P_2 = P_S$, $T_2 = T_S$. С учётом этих равенств система уравнений (4),(5),(8)-(11) содержит 12 неизвестных: P_2, W_2, T_2, m_{2G}, h_2^*, r, h_2, S_{02}^*, S_{02}, P_2^*, T_2^*, x_2. Дополнив её введённым ранее соотношением $x_2 = m/m_{2G}$ и уравнениями связи термодинамических параметров с температурой: $r = f(T_2)$, $h_2 = f(T_2)$, $h_2^* = f(T_2^*)$, $S_{02} = f(T_2)$, $S_{02}^* = f(T_2^*)$, получаем замкнутую систему уравнений, позволяющую найти значения всех необходимых параметров потока за скачком конденсации для моногаза. Решается система численно с использованием комбинированного алгоритма решения трансцендентных уравнений. Этот алгоритм включает в себя поисковый метод Ньютона, метод наискорейшего спуска и покоординатный спуск, которые подключаются автоматически в зависимости от сложившейся ситуации.

Для смеси газов задача осложняется тем, что такие параметры, как T_S и P_S не обладают свойством аддитивности и поэтому нельзя использовать в расчёте уравнение (9). Кроме того, газовая и жидкая фазы имеют разные составы и поэтому для определения степени сухости потока необходимо использовать уравнение (7) вместо уравнения (8). Для этого случая уравнение связи, определяющее количество и состав жидкой и газовой фаз в зависимости от давления P_2 и температуры T_2, можно получить из следующих соображений. Записывается уравнение баланса для смеси в целом и каждой её составляющей

$$F = G + L \qquad (12)$$

$$F\,\bar{z}_i = G\bar{x}_i + L\bar{y}_i, \qquad (13)$$

где F, G, L – количество молей смеси, газовой фазы, жидкой фазы, $\bar{z}_i = z_i / F$ - относительное число молей i-ого компонента смеси, $\bar{x}_i = x_i / G$ - относительное число молей j - ого компонента газа, $\bar{y}_i = y_i / L$ - относительное число молей j - ого компонента жидкости. Фазовое равновесие каждого компонента описывается уравнением [5]

$$\bar{y}_i = \bar{x}_i\, P_{Si} / P_2, \qquad (14)$$

где P_{Si} – давление насыщенных паров i-ого компонента при температуре T_2. После подстановки (12) и (13) в (14) получается:

$$F\,\bar{z}_i = G\bar{y}_i P_{Si}/P_2 + (F-G)\bar{y}_i\,, \qquad (15)$$

Если обе части (15) разделить на F, ввести обозначение E = G/F, решить уравнение относительно $\bar{y}_i$ и использовать (14), то получится:

$$\bar{y}_i = \frac{\bar{z}_i}{E\left(\frac{P_{Si}}{P_2}-1\right)+1}, \quad \bar{x}_i = \frac{\bar{z}_i\,P_{Si}/P_2}{E\left(\frac{P_{Si}}{P_2}-1\right)+1}. \qquad (16)$$

Так как $\sum_1^n \bar{x}_i = \sum_1^n \bar{y}_i = 1$, где n- число компонентов смеси, то можно записать

$$\sum_1^n \bar{x}_i + \sum_1^n \bar{y}_i = \sum_1^n \frac{\bar{z}_i\left(P_{Si}/P_2-1\right)}{E\left(\frac{P_{Si}}{P_2}-1\right)+1} = 0. \qquad (17)$$

Если вместо мольных долей ввести весовые, используя известное соотношение $\bar{z}_i = \bar{m}/(\mu_i R_i)$, где $\bar{m}_i = m_i/m_2$, m_i, μ_i, R_i – масса, молекулярный вес и газовая постоянная i- ой составляющей потока, то получится:

$$\sum_1^n \frac{\frac{\bar{m}_i}{\mu_i R_i}\left(P_{Si}/P_2-1\right)}{E\left(\frac{P_{Si}}{P_2}-1\right)+1} = 0. \qquad (18)$$

В этом уравнении содержится одна неизвестная E, которая может изменяться в диапазоне $0 \le E \le 1$. Если $E \ge 1$, то G = F – смесь состоит только из газа. Если $E \le 0$, то G = 0 – смесь состоит только из жидкости. Зная величину E можно по уравнениям (16) найти мольные доли всех составляющих жидкой и газовой фаз, а затем и весовые составляющие этих фаз.

В результате, для расчёта параметров потока после скачка конденсации при течении через активное сопло смеси газов в описанную ранее систему уравнений необходимо включить следующие изменения:

а) Вместо уравнения (9) используется уравнение (18).

б) Вместо уравнения (8) используется уравнение (7).

в) Появляются новые неизвестные h_{2L} и h_{2L}^* и, соответственно, дополнительные уравнения:

$h_{2L} = f(T)$ и $h_{2L}^* = h_{2L} + W_2^2/2$.

Величины параметров потока после скачка конденсации являются исходными данными для расчёта термодинамически равновесного истечения потока через выходное сечение сопла Лаваля F_C. Для расчёта используются следующие уравнения, в которых индекс «с» применён для параметров выходного сечения сопла.

Уравнение энергии, в основу которого принята форма (6). Величины h_{CG}^* и h_{CL}^* (энтальпии торможения для газовой и жидкой фаз в выходном сечении) можно заменить с использованием соотношения $h = h^* - W^2/2$. Учитывая также

$$h_{CG} = h_{CG}^* + (1-x_C)(h_{CG} - h_{CL}) \qquad (19)$$

получаем:

$$h_{CG}^* = h_{2G}^* + (1-x_C)(h_{CG} - h_{CL}) \qquad (20)$$

Уравнение связи между давлением P_S и температурой насыщения T_S индивидуального вещества (9). Причём $P_C = P_S$, $T_C = T_S$.

Условие изоэнтропного процесса расширения:

$$s_2 = x_C\,s_G + (1-x_C)\,s_L\,, \qquad (21)$$

где s_G и s_L энтропия газовой и жидкой фаз в конце процесса расширения. Учитывая, что $s_2 = S_{02} - R_{2G}\ln(P_2)$ и $s_L = s_L^G - r/T$, где s_L^G - энтропия газа, соответствующего по составу жидкой фазе, получаем:

$$x_C = \frac{S_{02} - R_{2G}\ln(P_2) - S_{0CL}^G + R_L\ln(P_C) + r/T_C}{S_{0CG} - R_{CG}\ln(P_C) - S_{0CL}^G + R_{CL}\ln(P_C) + r/T_C}, \qquad (22)$$

где S_{0CL}^G - величина функции S_0 в сечении «с» для газа, соответствующего по составу жидкой фазе. Для моногаза состав жидкой и газовой фаз одинаков. Поэтому $R_{CG} = R_{CL} = R_C$, $S_{0CG} = S_{0CL}^G = S_{0C}$ и соответственно

$$x_C = \frac{S_{02} - S_{0C} - R_C\ln(P_2/P_C)}{r/T_C} + 1. \qquad (23)$$

Уравнение адиабаты

$$S_{0C}^* - S_{0C} = R_G\ln\frac{P_C^*}{P_C}. \qquad (24)$$

Уравнение расхода

$$m_{2G}\,x_C = \frac{P_C W_C F_C}{R_{CG} T_C}. \qquad (25)$$

Система уравнений (9) ,(19), (20), (23), (24), (25) при использовании её для моногаза, содержит 12 неизвестных величин: h_{CG}^*, h_{CG}, h_{CL}, x_C, P_C, T_C, W_C, P_C^*, T_C^*, S_{0C}, S_{0C}^*, r. После дополнения её соотношениями для расчёта термодинамических функций $h_{CG} = f(T_C)$, $h_{CG}^* = f(T_C^*)$, $S_{0C} = f(T_C)$, $S_{0C}^* = f(T_C^*)$, $r = f(T_C)$, $h_{CL} = h_{CG} - r$ получается замкнутая система уравнений, позволяющая определить все неизвестные параметры на выходе из сопла.

При расчёте параметров потока смеси газов на выходе из сопла, по аналогии с расчётом скачка конденсации, в систему для расчёта моногаза включаются следующие изменения:

а) Вместо уравнения (9) используется уравнение (18).

б) Вместо уравнения (23) используется уравнение (22).

в) Появляются новые неизвестные S_{0CG} и S_{0CL}^G и, соответственно, дополнительные уравнения: $S_{0CG} = f(T_C)$ и $S_{0CL}^G = f(T_C)$.

На базе, описанных выше, систем уравнений реализована математическая модель активного сопла, которая, в свою очередь, включена в программный комплекс «Поток» [6], предназначенный для термогазодинамических расчётов энергоустановок различных схем и вакуумсоздающих устройств. Модель позволяет провести расчёт истечения из сопла различных газов или их смесей, если известны зависимости термодинамических свойств от температуры, уравнение по описанию линии насыщения и уравнение зависимости теплоты парообразования от температуры. В комплексе «Поток» все эти зависимости записываются в специализированную базу данных и в дальнейшем используются по мере необходимости.

Для проверки адекватности полученной модели проведён расчёт истечения перегретого пара с давлением 1 МПа и температурой 212°С (перегрев 32°) из расширяющегося сопла с диаметром критического сечения 15.7 мм, диаметром выходного сечения 40 мм и длиной 130 мм. Степень расширения пара в сопле получилась равной P_C/P_0^*=0.029. По результатам экспериментальных исследований этого сопла, приведённых в [3] эта величина равна 0.035-0.04 (точность снятия данных с графика, приведённого в работе). Рассогласование очень невелико, тем более что в расчётных уравнениях фигурирует прямой скачок вместо реального косого скачка конденсации.

Для оценки влияния учёта скачка конденсации в активном сопле на параметры вытекающего потока проведён расчёт четырёхступенчатого пароэжекторного вакуумного насоса при давлении всасывания 2 тор, используемого для вакуумирования одной из колонн ректификации. Расчёт проведён дважды: с учётом скачков в активных соплах и без них. Различие выходного импульса активных сопел для этих расчётов оказалось примерно одинаковым для всех ступеней и укладывается в 3.5%. Тем не менее, это привело к разности в производительности насосов примерно в 1.5 раза, что говорит о том, что при расчётах нельзя игнорировать влияние скачка конденсации на истечение потока из активного сопла.

Литература

1. Э.В. Осипов, С.И. Поникаров, Э.Ш. Теляков, Вестник Казан. технол. ун-та, 18, С. 193-201 (2011).
2. Э. В. Осипов, Ф.М. Сайрутдинов, Э. Ш. Теляков, К.С. Садыков, Вестник Казан. технол. ун-та, 13, - С. 158-163 (2012)
3. М. Е. Дейч, Г.А. Филиппов Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергия, 1968. С. 423.
4. С.Л. Ривкин Термодинамические свойства газов. М.: Энергия, 1973. С. 269.
5. В.В. Кафаров Основы массопередачи. М.: Высшая школа,1972. С. 494.
6. Э.Б. Мац, В.М. Гуреев, Д.А. Малышкин. Программный комплекс «ПОТОК» для численного моделирования термогазодинамических процессов в энергоустановках. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011613786.

© **Э. Ш. Теляков** – д-р техн. наук, проф. каф. машин и аппаратов химических производств КНИТУ, mahp_kstu@mail.ru; **Т. С. Козырева** – канд. техн. наук, доц. каф. теплогазоснабжения и вентиляции КГАСУ, kozyrevats@ mail.ru; **Э. В. Осипов** – канд. техн. наук, доц. каф. машин и аппаратов химических производств КНИТУ; **Э. Б. Мац** – канд. техн. наук, доц. каф. технологии машиностроительных производств КНИТУ им. А.Н. Туполева, meb10@ yandex.ru.