

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 парозежекторного 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 расширения 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 (скачок 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 скачок конденсации. Как показали экспериментальные исследования [3], предельное переохлаждение газа, после которого происходит скачок, зависит от формы канала (градиента скорости вдоль его оси) и начального перегрева газа на входе в сопло относительно состояния термодинамического равновесия: ΔT , (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: $M = K_M \cdot \alpha_C + \dots$, (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 $\lambda_{СК}$, которая, в свою очередь, определяется в зависимости от числа Маха по уравнению $\lambda_{СК} = (3)$ 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) скачок 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 $m_2 G = \rho_2 W_2 F_1$. После подстановки вместо $\rho_2 = 1/v_2$ соответствующего значения из уравнения состояния получается: \dots (4) где \dots - расход и газовая постоянная газовой фазы после скачка. Уравнение импульсов (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 $h_2^* = x_2 h_2 G^* + (1 - x_2) h_2 L^*$, где: $x_2 = m_1 / m_2 G$ степень сухости потока, $h_2 G^*$, $h_2 L^*$ - энтальпии торможения газовой и жидкой фаз. После подстановки значения h_2^* в уравнение энергии получается: (6) Решая (6) относительно x_2 имеем: (7) Если поток состоит из одного индивидуального вещества (моногаз), то $h_2 L^* = h_2^* - r$, где r - теплота парообразования моногаза. В этом случае уравнение (7) приводится к виду: (8) Уравнение связи между давлением P_S и температурой насыщения T_S индивидуального вещества (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 (10) Уравнение адиабаты [4] (11) где $S_0 = \dots$ - 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: $P_2, W_2, T_2, m_2 G, h_2^*, r, h_2, S_0^*, S_0, P_2^*, T_2^*, x_2$. Дополнив её введённым ранее соотношением $x_2 = m_1 / m_2 G$ и уравнениями связи термодинамических параметров с температурой: $r = f(T_2)$, $h_2 = f(T_2)$, $h_2^* = f(T_2^*)$, $S_0 = f(T_2)$, $S_0^* = f(T_2^*)$, 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 усложняется 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 (12), (13) где F , G , L – количество молей смеси, газовой фазы, жидкой фазы, i – относительное число молей i -ого компонента смеси, j – относительное число молей j -ого компонента газа, k – относительное число молей k -ого компонента жидкости. Фазовое равновесие каждого компонента описывается уравнением [5] (14) где P_{Si} – давление насыщенных паров i -ого компонента при температуре T_2 . После подстановки (12) и (13) в (14) получается: (15) Если обе части (15) разделить на F , ввести обозначение $E = G/F$, решить уравнение относительно E и использовать (14), то получится: (16) Так как n – число компонентов смеси, то можно записать (17) Если вместо мольных долей ввести весовые, используя известное соотношение $w_i = m_i / \sum m_i$, где m_i , μ_i , R_i – масса, молекулярный вес и газовая постоянная i -ой составляющей потока, то получится: (18) В этом уравнении содержится одна неизвестная E , которая может изменяться в диапазоне $0 \leq E \leq 1$. Если $E \geq 1$, то $G = F$ – смесь состоит только из газа. Если $E \leq 0$, 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 $h_{2L}^* = h_{2L} + W^2/2$. Величины параметров потока после скачка конденсации являются исходными данными для расчёта термодинамически равновесного истечения потока через выходное сечение сопла Лавала 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 (19) получаем: (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: $s_2 = x_C s_G + (1-x_C) s_L$, (21) где s_G и s_L энтропия газовой и жидкой фаз в конце процесса расширения. Учитывая, что $s_2 = S_{O2} - R_2 G \ln(P_2)$ и $s_L = s_{LG} - r/T$, где s_{LG} - энтропия газа, соответствующего по составу жидкой фазе, получаем: (22) где S_0 - величина функции S_0 в сечении «с» для газа, соответствующего по составу жидкой фазе. Для моногаза состав жидкой и газовой фаз одинаков. Поэтому $R_{CG} = R_{CL} = R_C$, $S_{0C} = S_{0C}$ и соответственно (23) Уравнение адиабаты (24) Уравнение расхода. (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 h_{CL} и r , соответственно, дополнительные уравнения: $h_{CL} = h_{CG} - r$ и $r = f(T_C)$. 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°C (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 косоугольного скачка конденсации. Для оценки влияния учёта скачка конденсации в активном сопле на параметры вытекающего потока проведён расчёт четырёхступенчатого парожетекторного

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.