

Г.А. Кляхин, магистрант (ОАО «ГродноАзот», г. Гродно);
В.С. Францкевич, зав. кафедрой МиАХиСП, канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ПАРОЭЖЕКТОРНЫХ УСТАНОВОК

Несмотря на внешнюю простоту устройства пароструйного эжектора, происходящие в нем термо- и газодинамические процессы сложны и до сих пор не изучены полностью. Исследованию особенностей этих процессов посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ как зарубежных, так и отечественных исследователей [1–4].

В настоящее время существуют три направления расчёта пароструйных эжекторов. Одно из них (теоретическое) основано на детальном рассмотрении процессов расширения, смешения и сжатия потоков с детальной количественной оценкой потерь на каждом этапе. Для описания происходящих процессов используются обычные термодинамические зависимости истечения газов и пара. Применительно к эжекторам конденсационных установок паровых турбин такая теория была развита и систематизирована Блюдовым [5].

Детальное рассмотрение процессов в отдельных элементах проточной части эжектора (сопло, камера смешения, диффузор) – достоинство методов теоретического направления. В то же время ряд допущений настолько снижает точность, что громоздкость этих методов становится неоправданной.

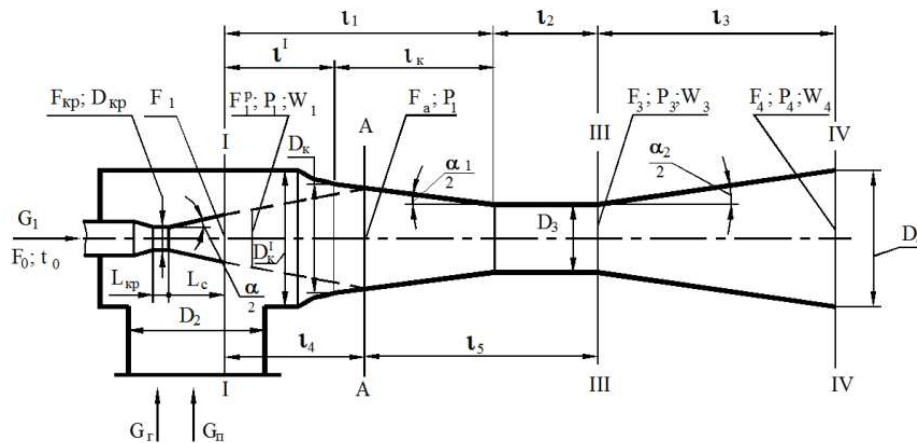
Отличительная черта второго направления (полуэмпирического) – отказ от детальной оценки процессов в отдельных частях проточной части эжектора и применение в расчете газодинамических функций [2, 3]. Авторы этих методик выводят расчетные уравнения для определения зависимости между геометрическими и газодинамическими параметрами в ряде основных сечений эжектора: в критическом сечении и на выходе из сопла, в начале и конце камеры смешения, за диффузором. В этих работах выводятся расчетные уравнения, в том числе с использованием достижений газовой динамики, моделируется на этой основе характер физических процессов в пароструйном эжекторе (предельные режимы), исследуются переменные режимы (характеристики) как одноступенчатого, так и многоступенчатого эжектора, определяется наиболее экономичный (предельный) режим. Принимая, что в двух сечениях проточной части эжектора – в критическом сечении сопла и в

цилиндрической части диффузора реализуются критические (со скоростью звука) режимы течения газов, рассчитывается соотношение площади данных проходных сечений.

Определение осевых размеров струйных насосов проводится с помощью экспериментальных данных, путем введения различных поправочных коэффициентов.

Такой подход существенным образом отличает его от первого направления и накладывает некоторые ограничения, связанные с возможностью расчёта только тех режимов и конструкций, для которых известны необходимые эмпирические величины.

Основные геометрические параметры пароструйного эжекторного вакуум-насоса представлены на рисунке 1.



F – площадь сечения; D – диаметр; P – давление; t – температура; W – скорость потока; G – расход; L – длина элемента; l – длина участка; α – угол; I – выходное сечение сопла; $A-A$ – «эффективное сечение»; III – выходное сечение камеры смешения/входное сечение диффузора; IV – выходное сечение диффузора.

Рисунок 1 – Схема пароструйного аппарата эжектора с обозначением основных геометрических параметров и потоков сред

Учитывая сложность газодинамических процессов в сверхзвуковом эжекторе, авторы третьего направления – эмпирического – отказываются от выводов громоздких расчетных уравнений. Эмпирическая методика расчета, основанная на результатах исследования большого количества пароструйных эжекторов, наиболее полно разработана Вигандом. Он установил, что коэффициент эжекции эжектора зависит от трех величин: давления рабочего пара, давления пара на выходе из сопла и давления сжатой смеси. Для практических целей удобнее выражать расход пара в зависимости от соотношений между этими величинами, а именно, от степени расширения $E = P_{pn} / P_1$ пара в сопле и степени сжатия $\varepsilon = P_4 / P_1$ паровоздушной смеси в эжекторе. Следова-

тельно, коэффициент эжекции, равный отношению расхода эжектируемой парогазовой смеси к расходу рабочего пара, определяется функциональной зависимостью (1).

$$u_{\varepsilon} = f(E, \varepsilon). \quad (1)$$

Из этого выражения следует, что геометрически подобные эжекторы при одинаковых рабочих условиях имеют одинаковые рабочие характеристики. Функциональная зависимость может (1) использоваться для расчёта эжекторов, удаляющих чистый пар, паровоздушную или газовую смесь, а также воздух. Определяемые коэффициенты эжекции несколько занижены относительно реальных, что приводит к увеличению расхода рабочего пара на ступень. Функциональная зависимость (1) графически представлена на диаграмме для определения коэффициента эжекции u_{ε} .

При определении основного геометрического параметра эжектора $F_{кр} / F_3$ ($F_{кр}$ – площадь критического сечения сопла, F_3 – площадь сечения цилиндрического участка диффузора) Рамм исходит из того, что в обоих сечениях достигается критическая скорость истечения, равная местной скорости звука. Это позволяет использовать простые термодинамические зависимости [9].

Достоинством эмпирических методов является простота расчета и надежность, а недостатком – ограниченность их применения конкретным диапазоном исследованных конструкций и режимов функционирования эжекторов. Ряд методик расчета эжекторов, относящихся к полумпирическому и эмпирическому направлениям, получил распространение при разработке многоступенчатых устройств по перекачке газовых смесей в химической промышленности.

Методика Калужского турбинного завода (КТЗ) основана на большом объеме экспериментальных данных для многоступенчатых эжекторов конкретных геометрических характеристик. Ряд исследований [1,4] подтвердил, что методика применима в широком диапазоне изменения параметров пара, коэффициентов эжекции и степеней сжатия пароструйных эжекторов. В результате обработки большого числа экспериментальных данных построена обобщенная диаграмма для расчета ступеней 2-х, 3-х ступенчатых пароструйных эжекторов [4]. Диаграмма использует данные, полученные при испытаниях эжекторов с проточной частью, выполненной по типу схемы, приведенной на рисунке 1 при оптимальном расстоянии сопла от камеры смешения. Использование диаграммы существенно упрощает расчет эжекторных ступеней и одновременно обеспечивает высокую надежность данных, которые базируются на результатах многочисленных экспериментов.

Важнейшей характеристикой эжектора при заданных параметрах пара является отношение сечения цилиндрической камеры смешения F_3 к критическому сечению рабочего сопла $F_{кр}$ (основной геометрический параметр эжектора) (см. рис. 1):

$$F^* = \frac{F_3}{F_{кр}} = \left(\frac{D_3}{D_{кр}} \right), \quad (2)$$

где $D_{кр}$ – критический диаметр сопла, мм; D_3 – диаметр цилиндрического участка диффузора, мм.

Выбор этого параметра в значительной степени определяет размеры ступени эжектора. Характеристику пароструйного эжектора можно изменять, меняя расход рабочего пара. Возрастание расхода пара при любом фиксированном положении сопла вызывает увеличение степени сжатия, а также приводит к росту давления всасывания при малых расходах воздуха. С увеличением расхода рабочего пара производительность эжектора уменьшается в области малых давлений всасывания и растет в области повышенных давлений всасывания. Таким образом, для эжекторов любых размеров в области повышенных давлений всасывания можно получить большие расходы эжектируемого газа, если увеличить расход рабочего пара. Это дает возможность снижать капитальные затраты за счет уменьшения размеров эжектора, но приводит, в свою очередь, к увеличению эксплуатационных расходов.

Методики расчета эжекторов, относящихся к полуэмпирическому и эмпирическому направлениям, более предпочтительны при разработке многоступенчатых устройств по перекачке газовых смесей в химической промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берман Л.Д. Воздушные насосы конденсационных установок паровых турбин. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 96 с.
2. Соколов Е.Я. Струйные аппараты – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
3. Робожев А.В. Методика расчета многоступенчатых пароструйных эжекторов. – М.: Машиностроение 1965. – 76 с.
4. Шкловер Г.Г. Исследование и расчет конденсационных установок паровых турбин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
5. Блюдов В.П. Конденсационные устройства паровых турбин. – М.: Госэнергоиздат, 1951. – 207 с.