

1 Принципиальная схема и термодинамика струйного аппарата

Струйными аппаратами называют устройства, в проточных каналах которых происходит смешение двух газовых струй, сопровождающееся увеличением полного давления низконапорного (пассивного) потока за счет энергии другого высоконапорного (активного) потока. В процессе смешения энергия от одного потока передается к другому, также образуются скачки уплотнения в случаях сверхзвуковой скорости течения хотя бы одной из смешиваемых струй. В результате полное давление смеси становится больше полного давления пассивного газа, но меньше полного давления активного газа [1, стр. 383].

Принцип работы газового эжектора можно показать на расчетной схеме, представленной на рис. 1.1 [2, стр. 339]:

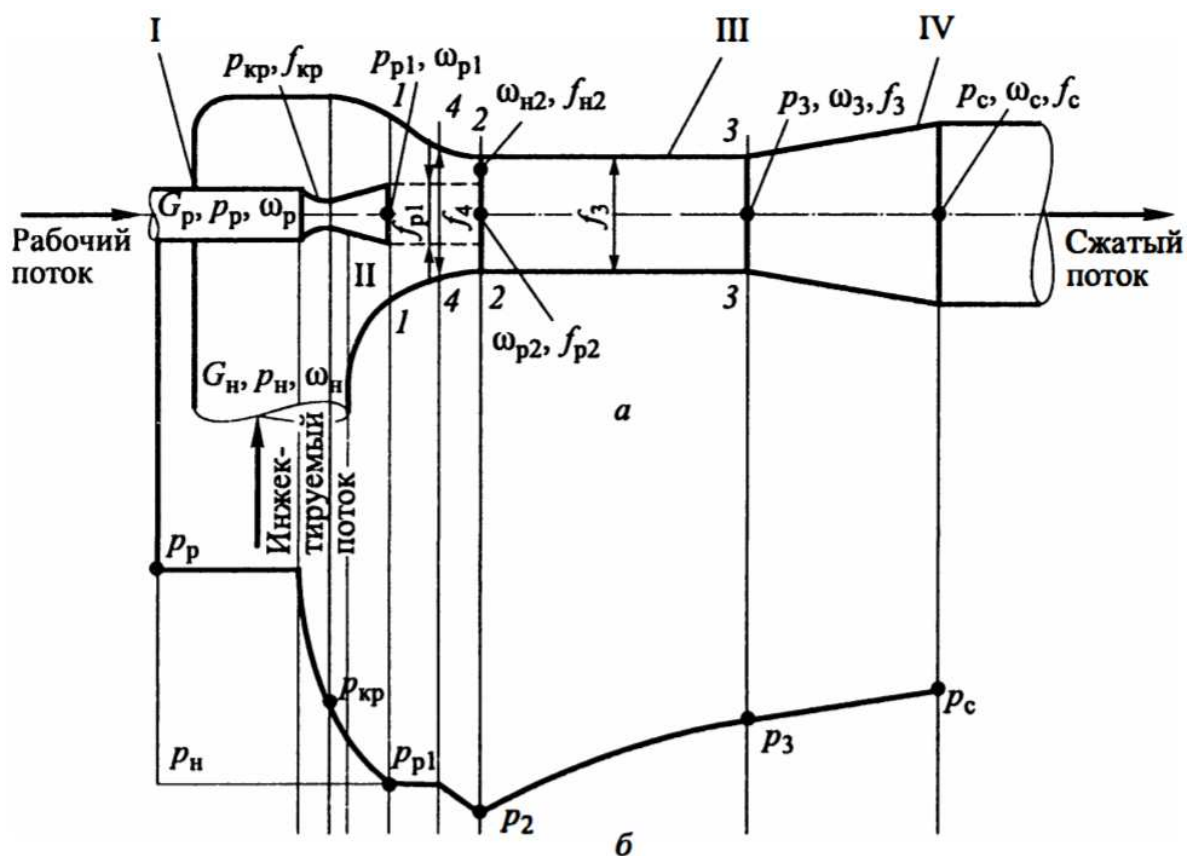


Рисунок 1.1 – Расчетная схема струйного аппарата (а) и изменение статического давления вдоль оси струйного аппарата (б):

I – рабочее сопло; II – приемная камера; III – камера смешения;
IV – диффузор

При описании процесса работы газового эжектора применяются следующие обозначения. В струйный аппарат поступает поток рабочего газа под высоким давлением p_p при температуре T_p . За счет энергии рабочего потока происходит сжатие инжектируемого потока низкого давления p_n , имеющего температуру T_n . При этом из аппарата выходит смешанный поток, имеющий некоторое среднее давление p_c и температуру T_c . Повышение давления потока инжектируемой среды от p_n до p_c осуществляется с одновременным увеличением его температуры от T_n до T_c .

Рабочий газ с давлением p_p и скоростью w_p подводится к соплу, имеющему расширяющуюся форму, поскольку степень снижения давления газа в сопле $p_p/p_n > 1/\overline{p_{кр}}$ ($\overline{p_{кр}}$ – критическое давление, при котором достигается местная скорость звука). В результате расширения газа давление в сопле падает с p_p до $p_{p1} = p_n$, а скорость увеличивается от w_p до w_{p1} . Скорость газа w_{p1} в сечении f_{p1} на выходе из сопла больше критической скорости $a_{кр}$, достигаемой в потоке в критическом сечении сопла $f_{кр}$. Рабочий газ, выходящий из сопла в приемную камеру со скоростью w_{p1} , подсасывает из приемной камеры газ, который подводится в приемную камеру с давлением p_n . По мере удаления от сопла массовый расход движущегося потока газа непрерывно возрастает за счет подсасывания инжектируемой среды, а поперечное сечение движущегося потока увеличивается.

На некотором расстоянии от выходного сечения сопла поток, движущийся по направлению к камере смешения, заполняет полностью все сечение f_4 приемной камеры. Массовый расход движущегося потока в этом сечении составляет $(G_p + G_n)$, где G_p – расход рабочего газа; G_n – расход инжектируемого газа. Профиль скоростей в этом сечении имеет большую неравномерность по радиусу. На границе струи скорость газа мала, а на оси она близка к скорости истечения w_p . Сечение, занимаемое потоком, при дальнейшем его движении определяется профилем струйного аппарата, так как любое сечение эжектора, расположенное правее сечения f_4 , заполнено

движущимся потоком. Сечение f_4 является конечным сечением камеры смешения. В большинстве случаев камера смешения имеет цилиндрическую форму с сечением $f_3 < f_4$, и движущийся поток проходит через ее входной участок, на котором его сечение уменьшается с f_4 до f_3 . При этом скорость потока на участке увеличивается, а давление падает. Во входном сечении 2 – 2 камеры смешения давление потока равно p_2 .

Процесс выравнивания скоростей в камере смешения струйных аппаратов сопровождается изменением давления. Поскольку цилиндрическая камера смешения в отличие от камер другого профиля позволяет обеспечить большую степень восстановления давления [2, стр. 339], в струйных аппаратах она получила широкое применение. В такой камере выравнивание скоростей сопровождается повышением давления от p_2 на входе до p_3 на выходе из нее. После этого поток поступает в диффузор, в котором его давление возрастает от p_3 до p_c , а скорость уменьшается с w_3 до w_c . При давлении p_c смешанный поток со скоростью w_c выходит из струйного аппарата.

Согласно схеме процесса работы струйного аппарата, на диаграмме $i - s$, представленной на рис. 1.2, точка A определяет состояние рабочего потока перед аппаратом, точка D – состояние инжектируемого потока. Состояние рабочего и инжектируемого потоков в конце процесса расширения (на входном участке камеры смешения) характеризуется точками R и M соответственно. В результате превращения части энергии потока $(\Delta i_{sp} + \Delta_{ск})\varphi_1^2$ в кинетическую энергию скорость рабочего потока во входном сечении цилиндрической камеры смешения достигает w_{p2} . Скоростной коэффициент φ_1 учитывает потери при расширении рабочего потока; величину φ_1^2 можно рассматривать как изоэнтропный КПД процесса расширения. На входном участке камеры смешения инжектируемая среда расширяется от давления p_H до p_2 , при этом вследствие превращения энергии $\Delta_{ск}\varphi_1^4$ в кинетическую скорость инжектируемого потока достигает в том же сечении значения w_{H2} . В камере смешения происходят выравнивание скоростей и повышение давления

перемешиваемых потоков. Состояние потока на выходе из камеры смешения определяется точкой E . При этом поток имеет некоторую среднюю скорость w_3 и статическое давление p_3 . Затем поток поступает в диффузор, в котором происходит преобразование кинетической энергии в потенциальную и тепловую энергии. Статическое давление потока становится равно p_c , а его энтальпия – i_c .

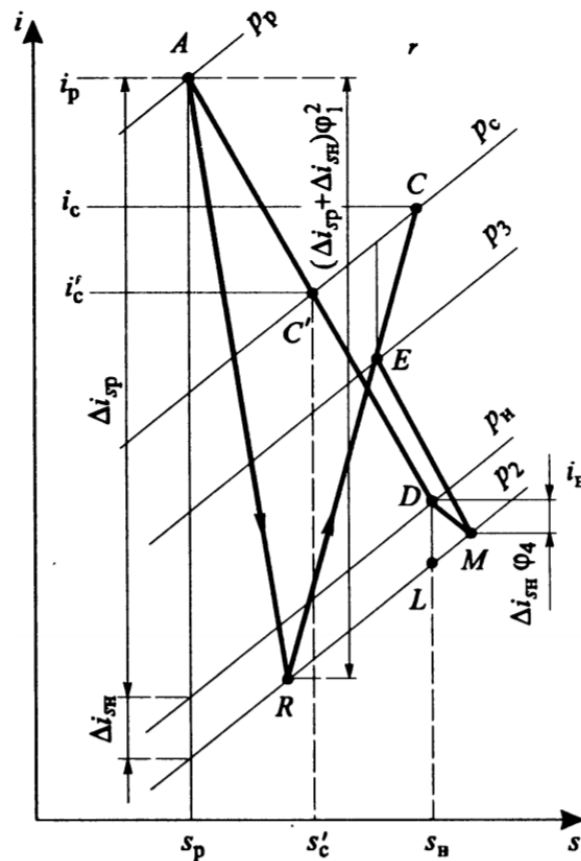


Рисунок 1.2. Процесс работы струйного аппарата на диаграмме $i - s$

Положение точки конца процесса смешения в идеальном аппарате C' выводится из первого закона термодинамики и закона сохранения энергии. Наряду с этим вводится наиболее значимый параметр струйного аппарата – коэффициент инжекции. Данный параметр определяет отношение расходов инжектируемого и рабочего потоков, а также является основным показателем, характеризующим эффективность струйного аппарата.

Для анализа эффективности струйных аппаратов применяется КПД, представляющий собой отношение эксергии, полученной инжектируемым потоком, к эксергии, затраченной рабочим потоком [3, стр. 26]:

$$\eta = \frac{u(e_c - e_H)}{e_p - e_c},$$

где e_p, e_H, e_c – удельные эксергии рабочего, инжектируемого и сжатого потоков. Под удельной эксергией в данном случае понимают работу, которую можно получить с помощью одной массовой единицы рабочего тела, например 1 кг газа, при обратимом изменении параметров торможения рабочего тела до параметров окружающей среды. Удельная эксергия определяется по формуле:

$$e = i_0 - i_{0.c} - T_{0.c.}(s_0 - s_{0.c.}),$$

или

$$e = c_p(T_0 - T_{0.c.}) \left(1 - \frac{T_{0.c.}}{T_{cp}} \right) + RT_{0.c.} \ln \left(\frac{p_0}{p_{0.c.}} \right)$$

где i_0, T_0, p_0, s_0 – удельная энтальпия, температура, давление, удельная энтропия рабочего тела в изоэнтропно заторможенном состоянии соответственно;

$i_{0.c.}, T_{0.c.}, p_{0.c.}, s_{0.c.}$ – удельная энтальпия, температура, давление, удельная энтропия рабочего тела в состоянии равновесия с окружающей средой соответственно;

T_{cp} – средняя логарифмическая температура между температурой рабочего тела в изоэнтропно заторможенном состоянии и температурой окружающей среды.

Из анализа формулы для КПД струйного аппарата с учетом выражения для эксергии следует, что процесс расчета эжектора может быть проведен для конкретно заданного значения коэффициента инжекции с определением энтальпии и давления потока после эжектора или при заданном давлении сжатия с определением коэффициента инжекции. Метод графического расчета эжекторов по диаграмме $i - s$ представлен в [3, стр. 27]. Альтернативное определение КПД, предложенное В.М. Раммом для газоструйных эжекторов приведено в [4, стр. 36].

На практике широкое распространение получили многоступенчатые струйные установки, в которых аппараты включаются последовательно или параллельно. При последовательной схеме включения аппаратов эквивалентный коэффициент инжекции определяется как:

$$u = G_{\text{н}}^I / \Sigma G_{\text{р}}$$

т.е. как отношение расхода инжектируемой среды первой (нижней) ступени к суммарному расходу рабочей среды во всех ступенях установки. Поэтому чем больше суммарный коэффициент инжекции u , тем меньше расходуется рабочей среды $\Sigma G_{\text{р}}$ на повышение давления заданного количества инжектируемой среды $G_{\text{н}}^I$ от давления $p_{\text{н}}^I$ до давления $p_{\text{с}}$.

2 Классификация струйных аппаратов

Наиболее грамотный подход к классификации струйных аппаратов, учитывающий существо происходящих в них процессах, представлен в [3, стр. 9]. Процессы, характерные для всех без исключения струйных аппаратов, описываются тремя законами:

1. Закон сохранения энергии:

$$i_p + ui_n = (1 + u)i_c$$

где i_p, i_n, i_c – энтальпии рабочего, инжектируемого и смешанного потоков;

$u = G_n/G_p$ – коэффициент инжекции, т.е. отношение массового расхода инжектируемого потока к массовому расходу рабочего потока.

2. Закон сохранения массы:

$$G_c = G_p + G_n$$

где G_p, G_n, G_c – массовые расходы рабочего, инжектируемого и смешанного потока.

3. Закон сохранения импульса:

$$I_{p1} + I_{n1} = \int_{f_3}^{f_1} p df + I_{c3}$$

где I_{p1}, I_{n1} – импульс рабочего и инжектируемого потоков во входном сечении камеры смешения;

I_{c3} – импульс смешанного потока в выходном сечении камеры смешения;

$\int_{f_3}^{f_1} p df$ – интеграл импульса по боковой поверхности камеры смешения между сечениями, проходящими через начало (f_1) и конец (f_3) камеры смешения. В цилиндрической камере $\int_{f_3}^{f_1} p df = 0$.

Импульс потока в любом сечении:

$$I = Gw + pf$$

где G – массовый расход; w – скорость; p – давление; f – сечение.

В зависимости от свойств и условий взаимодействия рабочего и инжектируемого потоков в струйных аппаратах возникает ряд дополнительных процессов, которые специфичны только для аппаратов определенного типа. Эти процессы существенно отражаются в работе аппаратов данного типа и должны учитываться при их расчете.

Классификация по агрегатному состоянию потоков. Процессы, происходящие в струйных аппаратах, зависят в первую очередь от агрегатного состояния взаимодействующих сред. В связи с этим можно выделить следующие три группы: (1) аппараты, в которых агрегатное состояние рабочей и инжектируемой сред одинаково; (2) аппараты, в которых рабочий и инжектируемый потоки находятся в разных агрегатных состояниях, не изменяющихся в процессе смешения этих потоков; (3) аппараты с изменяющимся агрегатным состоянием сред. В этих аппаратах рабочий и инжектируемый потоки до смешения находятся в разных фазах, а после смешения – в одной фазе, т.е. в процессе смешения изменяется агрегатное состояние одного из потоков.

К (1) первой группе относится газо-(паро-)струйные компрессоры, эжекторы и инжекторы, а также струйные насосы.

Ко (2) второй группе относятся струйные аппараты для пневмотранспорта, воздушные эжекторы и струйные аппараты для гидротранспорта.

К (3) третьей группе относятся пароводяные инжекторы и струйные подогреватели.

Классификация по упругим свойствам взаимодействующих сред. Условия работы струйных аппаратов зависят также от упругих свойств взаимодействующих сред. Под упругими свойствами ли сжимаемостью понимается значительное изменение удельного объема среды при изменении ее давления. На практике применяются струйные аппараты, в которых: (а) обе среды (рабочая и инжектируемая) упруги; (б) одна из сред упругая; (в) обе среды неупругие.

Классификация по степени сжатия. Работа равнофазных аппаратов с упругими средами зависит в значительной мере от степени сжатия инжестируемой среды, а также от степени расширения рабочей среды. Под степенью сжатия в данном случае понимается отношение давления, смешанного и инжестируемого потоков, а под степенью расширения (степенью снижения давления) – отношение давлений рабочего и инжестируемого потоков.

По степени сжатия и степени расширения равнофазные струйные аппараты для упругих сред можно классифицировать следующим образом:

1) аппараты с большой степенью расширения и умеренной степенью сжатия. Такие аппараты называют газоструйными или пароструйными компрессорами. Рабочей и инжестируемой средой в этих аппаратах является пар и газ. Степень расширения рабочего потока в компрессорах велика. Отношение давлений рабочего и инжестируемого потоков перед компрессором во много раз больше критического отношения давлений. Степень сжатия, развиваемая такими аппаратами, обычно находится в пределах $2,5 \geq p_c/p_n \geq 1,2$. К ним относятся аппараты повышения давления отбросного пара, газа в сети и др.;

2) аппараты с большой степенью расширения и большой степенью сжатия. Такие аппараты обычно применяются в установках, где требуется поддерживать глубокий вакуум. Такие аппараты называют газоструйными или пароструйными эжекторами. Степень расширения рабочего потока в эжекторах также весьма значительная. Отношение давлений рабочего и инжестируемого потоков перед эжектором p_p/p_n также во много раз больше критического отношения давлений. Степень сжатия, создаваемая такими аппаратами, $p_c/p_n \geq 2,5$;

3) аппараты с большой степенью расширения и малой степенью сжатия. Такие аппараты называют газоструйными или пароструйными инжекторами. Рабочей и инжестируемой средой в этих аппаратах является пар или газ. Степень расширения рабочего потока в инжекторах значительна, степень

сжатия мала: $p_c/p_n < 1,2$. Поскольку степень сжатия мала, упругие свойства инжектируемого и смешанного потоков проявляются слабо. Поэтому при расчете таких аппаратов в основных расчетных уравнениях могут не учитываться свойства сжимаемости инжектируемого и смешанного потоков. Равнофазные аппараты, в которых свойства сжимаемости рабочего и инжектируемого потоков не проявляются, называются струйными насосами.

Рабочей и инжектируемой средой в струйных насосах может быть как жидкость, так и газ или пар, но в этом случае степень расширения рабочего тела должна быть значительно меньше критического отношения давления, а также должна быть мала степень сжатия ($p_c/p_n \leq 1,2$).

Разнофазные струйные аппараты в зависимости от упругих свойств взаимодействующих сред можно разделить на три типа:

1) аппараты с упругой рабочей и неупругой инжектируемой средами. К таким аппаратам относятся пневмотранспортные струйные аппараты (газ инжектирует сыпучее твердое тело или жидкость);

2) аппараты с неупругой рабочей и упругой инжектируемой средами, к которым относятся жидкостно-газовые эжекторы, например воздушные эжекторы;

3) аппараты, в которых обе среды неупругие. К ним относятся аппараты для гидротранспорта твердых сыпучих тел, в которых жидкость инжектирует сыпучее твердое тело.

Струйные аппараты, в которых полностью изменяется агрегатное состояние одного из взаимодействующих потоков, можно разделить на два типа. К первому (1) типу относятся аппараты, в которых рабочей средой является пар, а инжектируемой – жидкость (парожидкостные инжекторы). Ко второму (2) типу относятся аппараты, в которых рабочей средой является жидкость, а инжектируемой – пар (струйные подогреватели).

Для наиболее наглядного представления изложенной классификации струйных аппаратов составлена табл. 2.1. В названии аппарата вначале, как правило, указывается вид рабочей среды (газ, пар, вода). Каждый из указанных

типов струйных аппаратов имеет свои характерные особенности, которые должны быть учтены при его расчете. В то же время все струйные аппараты имеют много общего, поскольку процессы их работы описываются уравнениями, приведенными ранее.

Поскольку в рамках данной работы рассматривается целесообразность применения струйного аппарата для повышения давления воздуха, подаваемого на расширение в турбину, за счет отработавших газов, являющихся рабочей средой, и обе среды имеют одинаковый фазовый состав, то дальнейшее рассмотрение конструкций и методов расчетов будет преимущественно для газоструйных компрессоров и газоструйных эжекторов.

Таблица 2.1 – Классификация струйных аппаратов

Группа аппаратов	Состояние взаимодействующих сред	Свойства взаимодействующих сред	Степень сжатия, создаваемая аппаратом	Аппараты
Равнофазные	Агрегатное состояние рабочей и инжектируемой среды одинаково	Упругие среды	1,2 – 2,5 > 2,5 < 1,2	Газо(паро) струйные компрессоры Газо(паро) струйные эжекторы Газо(паро) струйные инжекторы
		Неупругие среды	Любая	Струйные насосы
Разнофазные	Агрегатное состояние рабочей и инжектируемой сред неодинаково	Рабочая – упругая, инжектируемая – неупругая	Любая	Струйные аппараты для пневмотранспорта
		Рабочая – неупругая, инжектируемая – упругая	Любая	Водовоздушные эжекторы
		Рабочая и инжектируемая – неупругие	Любая	Струйные аппараты для гидротранспорта
Изменяющейся фазности	Агрегатное состояние одной из сред изменяется	Рабочая – упругая, инжектируемая – неупругая	Любая	Пароводяные инжекторы
		Рабочая – неупругая, инжектируемая – упругая	Любая	Пароводяные смешивающие подогреватели