

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СТРУЙНОГО АППАРАТА НА ПРЕДЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Винокуров М.В.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Традиционно проектирование струйных аппаратов и расчет их основных геометрических характеристик связаны с решением двух типов задач – достижение максимально возможного коэффициента эжекции при заданных значениях параметров активного и пассивного рабочих тел, либо обеспечение заданного коэффициента эжекции минимально необходимым энергетическим потенциалом активного рабочего тела.

Однако для решения отдельных технологических задач, не требующих обеспечения заданного расхода пассивного рабочего тела, основной целью является достижение максимально возможного, для данного энергетического потенциала активного потока, разрежения при незначительных величинах коэффициента эжекции, значением которых можно пренебречь.

Для жидкостного (например, водоструйного) эжектора это разрежение ограничено давлением насыщенного пара эжектирующей жидкости, а геометрические характеристики тракта с достаточной степенью точности описываются формулой Борда-Карно (см., например [1]).

Для газоструйных и пароструйных эжекторов традиционные [2] формы записи уравнения эжекции определяют предельное разрежение при нулевом коэффициенте эжекции как функцию некоторого суммарного эмпирического коэффициента потерь скорости активного потока по тракту, величина которого не зависит от энтальпии активного рабочего тела. Несмотря на простоту и удобство использования этих уравнений при проектировании струйных аппаратов, полученные по ним результаты расчета режимных параметров течения и геометрических характеристик тракта на предельном режиме работы, как количественно, так и качественно, расходятся с экспериментальными данными.

Причины этого расхождения легко обнаружить при анализе физической картины торможения сверхзвуковой недорасширенной струи идеального газа в канале цилиндрической формы. Эту модель с определенной степенью приближения можно применить к анализу рабочего процесса большинства газоструйных и пароструйных эжекторов.

При записи основных соотношений модели будем иметь в виду, что:

- активное рабочее тело представляет собой идеальный газ с показателем адиабаты " $k$ ";

- теплообмен с окружающей средой, физико-химические превращения в потоке, окружная и радиальная неравномерность течения отсутствуют;
- торможение сверхзвуковой струи осуществляется однократно в прямом скачке уплотнения с дальнейшим восстановлением полного давления дозвукового потока в расширяющемся диффузоре;
- расширение активного рабочего тела происходит в свободной струе до некоторого предельного разрежения, величина которого определяется запасом полного давления потока, необходимым для компенсации его потерь в прямом скачке уплотнения;
- вязкие потери в тракте и потери с выходной скоростью отсутствуют (при необходимости они легко могут быть учтены с помощью известных [3] эмпирических соотношений).

Обозначив полное давление потока перед скачком уплотнения  $P_{01}$  и полагая его равным полному давлению активного рабочего тела на входе в эжектор, а полное давление потока за скачком -  $P_{02}$  и считая его равным давлению окружающей среды, найдем максимально возможное разрежение, равное статическому давлению перед скачком  $P_1$ , с использованием газодинамических функций и соотношений для прямого скачка уплотнения [4].

Относительная (отнесенная к критической скорости звука) скорость течения перед скачком  $\lambda_1$  в этом случае будет однозначно определена отношением полных давлений

$$\frac{P_{02}}{P_{01}} = \lambda_1^2 \left[ \frac{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2}{1 - \frac{k-1}{k+1} \frac{1}{\lambda_1^2}} \right]^{\frac{1}{k-1}}.$$

Ее величина позволит рассчитать относительный диаметр цилиндрической камеры смешения (при условии ее «запирания» прямым скачком уплотнения) по отношению площадей  $q_1$  критического сечения активного сопла и скачка

$$q_1 = \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda_1 \left( 1 - \frac{\lambda_1^2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}},$$

а также максимальное разрежение потока  $P_1$ :

$$\frac{P_{02}}{P_1} = \frac{\lambda_1^2}{\left(1 - \frac{k-1}{k+1} \frac{1}{\lambda_1^2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2\right)}$$

Баланс удельных технических работ расширения активного потока и его сжатия в прямом скачке и диффузоре даст значение коэффициента восстановления скорости в скачке  $\varphi_{ск}$  как функцию энтальпии активного рабочего тела:

$$\varphi_{ск} = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{P_{02}}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \left(\frac{P_{01}}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}}}$$

Ниже представлены некоторые результаты численного анализа предложенной модели.

На рис.1 показана зависимость статического давления  $P_1$  перед прямым скачком уплотнения от полного давления  $P_{01}$  активного рабочего тела для трех значений показателя адиабаты  $k$ , характерных для воздуха ( $k=1,4$ ), продуктов сгорания топливной композиции метан-воздух ( $k=1,21$ ), продуктов сгорания топлива метан-кислород или насыщенного водяного пара ( $k=1,12$ ). Полученные данные показывают, что с ростом эксэргии активного потока, растет и максимально возможное разрежение в камере смешения эжектора.

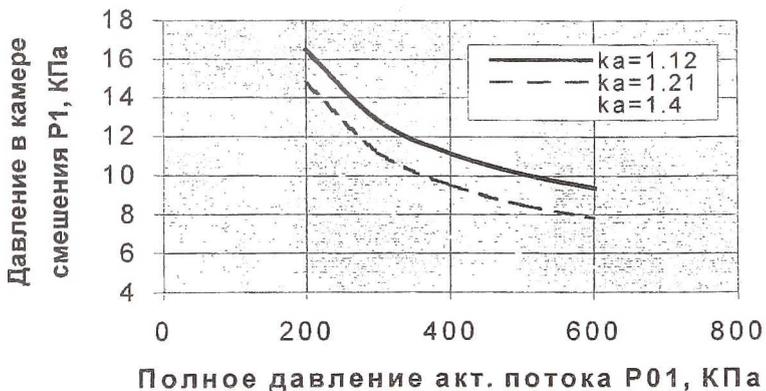


Рис. 1. Зависимость давления в камере смешения  $P_1$  от  $P_{01}$

Аналогичная зависимость для коэффициента восстановления скорости в скачке  $\varphi_{ск}$  показана на рис.2. Потери скорости также возрастают с ростом эксэргии потока. Это объясняет асимптотический вид зависимости показанной на рис.1.

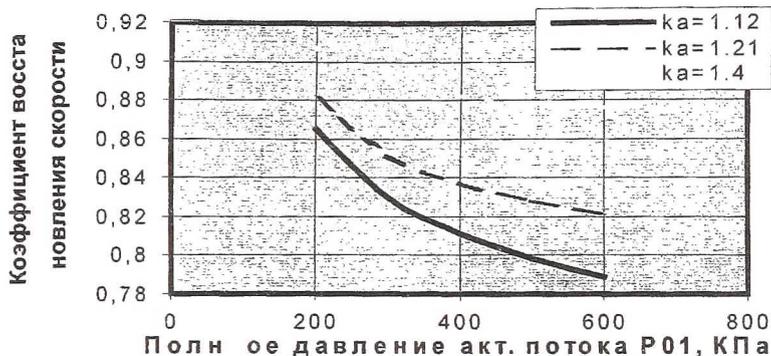


Рис. 2. Зависимость коэффициента восстановления  $\varphi_{ск}$  от  $P_{01}$

Наиболее эффективно влияние полного давления активного потока на максимально достижимое эжектором разрежение на начальном участке характеристики, при соизмеримых величинах давлений  $P_{01}$  и  $P_{02}$  (давление окружающей среды  $P_{02}$  полагалось равным 100 КПа). Дальнейшее повышение энергетического потенциала рабочего тела становится нецелесообразным ввиду существенного роста потерь в скачке уплотнения.

На рис.3 показана зависимость относительного (отнесенного к диаметру критического сечения активного сопла) диаметра цилиндрической камеры смешения  $q_1^{-0,5}$  от полного давления активного потока. Диаметр камеры смешения возрастает при увеличении степени расширения газа в свободной струе, обусловленном повышением его полного давления.

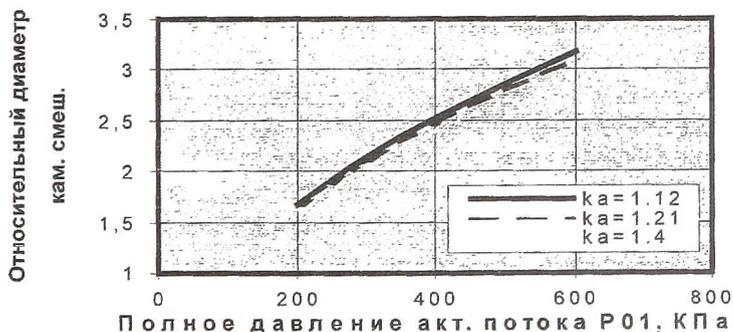


Рис. 3. Зависимость относительного диаметра камеры смешения от  $P_{01}$

Предложенная модель рабочего процесса струйного аппарата на предельном режиме работы получена теоретическим путем, что позволяет качественно правильно оценить потери при торможении сверхзвуковой недорасширенной струи газа, рассчитать максимально возможное разрежение и геометрические параметры тракта эжектора в зависимости от величины полных давлений активного рабочего тела и окружающей среды, в которую происходит истечение. Для более точного количественного согласования расчетных и экспериментальных данных вязкие потери в газодинамическом тракте могут быть легко учтены с помощью известных [3] эмпирических соотношений.

#### Список литературы

1. Васильев Ю.Н. Теория двухфазного газожидкостного эжектора с цилиндрической камерой смешения: Сб. "Лопаточные машины и струйные аппараты". Вып. 5. - М.: Машиностроение, 1971. - с. 175 - 261.
2. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. Изд. 2-е. - М.: Энергия, 1970. - 288 с.
3. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 367 с.
4. Борисенко А.И. Газовая динамика двигателей. - М.: ОБОРОНГИЗ, 1962. - 794 с.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА МОДЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА МНОГОФАЗНОГО СТРУЙНОГО АППАРАТА**

Первышин А.Н., Винокуров М.В.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

В работе [1] предложена модель рабочего процесса многофазного струйного аппарата технологической установки на базе ракетной камеры. Установка предназначена для решения широкого спектра технологических задач, к числу которых можно отнести резку материалов, нанесение износостойких и коррозионно-стойких покрытий, струйно-абразивную обработку и ряд других.

Активное рабочее тело струйного аппарата представляет собой высокотемпературную сверхзвуковую струю продуктов сгорания ракетного топлива, свойства которой определяются по методике [2]. Пассивным рабочим телом, в общем случае, является многофазная смесь компонентов, в состав которой входят сыпучий ингредиент (абразив, напыляемый материал и т.п.), жидкость (вода для пылегашения и теплозащиты газодинамического тракта) и транспортирующий газ. Для описания свойств такого рабочего тела использован подход, достаточно подробно изложенный в [3].