

## Методы исследования эжекторных усилителей тяги (ЭУТ)

В.А. Голубев, В.П. Монахова

Приведены результаты расчетно-теоретических и экспериментальных исследований характеристик эжекторного усилителя тяги. Получены значения коэффициента эжекции  $n=4,64$  и прироста тяги 50% (коэффициент увеличения тяги  $\delta \approx 1,5$ ) при относительной

длине эжекторного канала  $\bar{L}=6,7$  и отношении площадей на входе в эжектор  $\alpha=0,042$ .

На основании данных испытаний простого суживающегося профилированного сопла и сопла с эжекторным усилителем тяги [1, 2] были получены расходная  $G_c = f(\pi_c^i)$  (рис. 1) и тяговые

$P_c = f(\pi_c^i)$  и  $P = f(\pi_c^i)$  (рис. 2) характеристики соответственно простого суживающегося

профилированного сопла и сопла с эжекторным усилителем тяги; рассчитан коэффициент увеличения тяги исследуемого ЭУТ -  $\delta=1,5$ .

В настоящей работе авторами рассматриваются два независимых метода определения расходной и тяговой характеристик сопла с ЭУТ на основе экспериментально полученных распределения статического давления  $p_b$  по длине эжекторного насадка и распределения

полного давления  $p_{3i}^i$  по радиусу на выходе из камеры смешения.

Измеренные распределения статического давления  $p_b$  по длине эжекторного насадка на

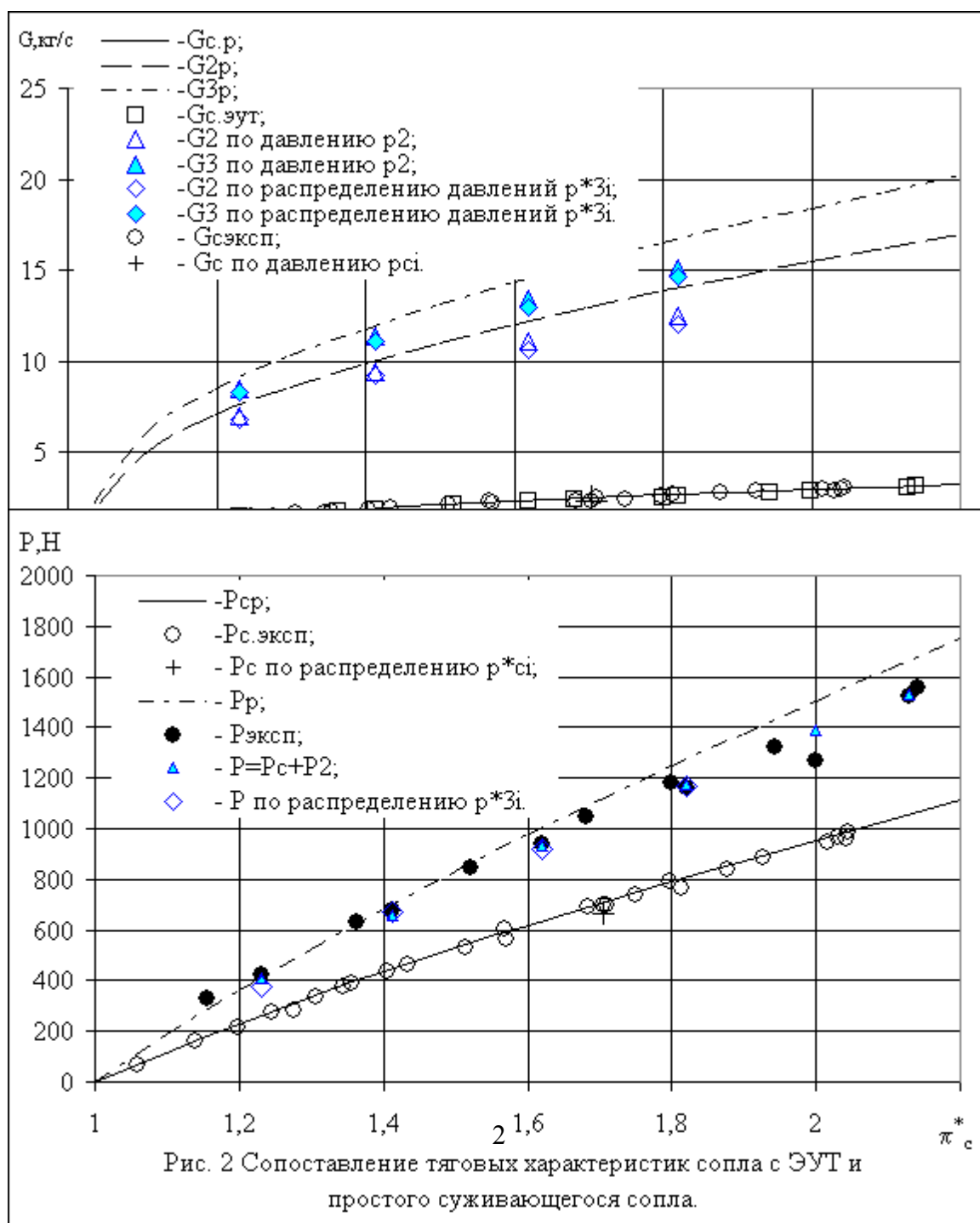
режимах  $\pi_c^i = 1,23; 1,41; 1,62; 1,82; 2; 2,13$  представлены на рис. 3. Наибольшая величина

разрежения  $(p_n - p_b)$  соответствует сечению входа в камеру смешения ЭУТ. Далее по длине

камеры статическое давление  $p_b$  постепенно повышается и на выходе из эжектора становится

равным атмосферному давлению -  $p_{э3} = p_n$ . Изменение статического давления  $p_2$  на входе в

камеру смешения относительно атмосферного  $p_n$  показано на рис. 4. Повышение  $p_c^*$  приводит к росту скорости истечения воздуха из эжектирующего сопла, и, следовательно, к увеличению разрежения  $(p_n - p_2)$  на входе в камеру смешения ЭУТ.





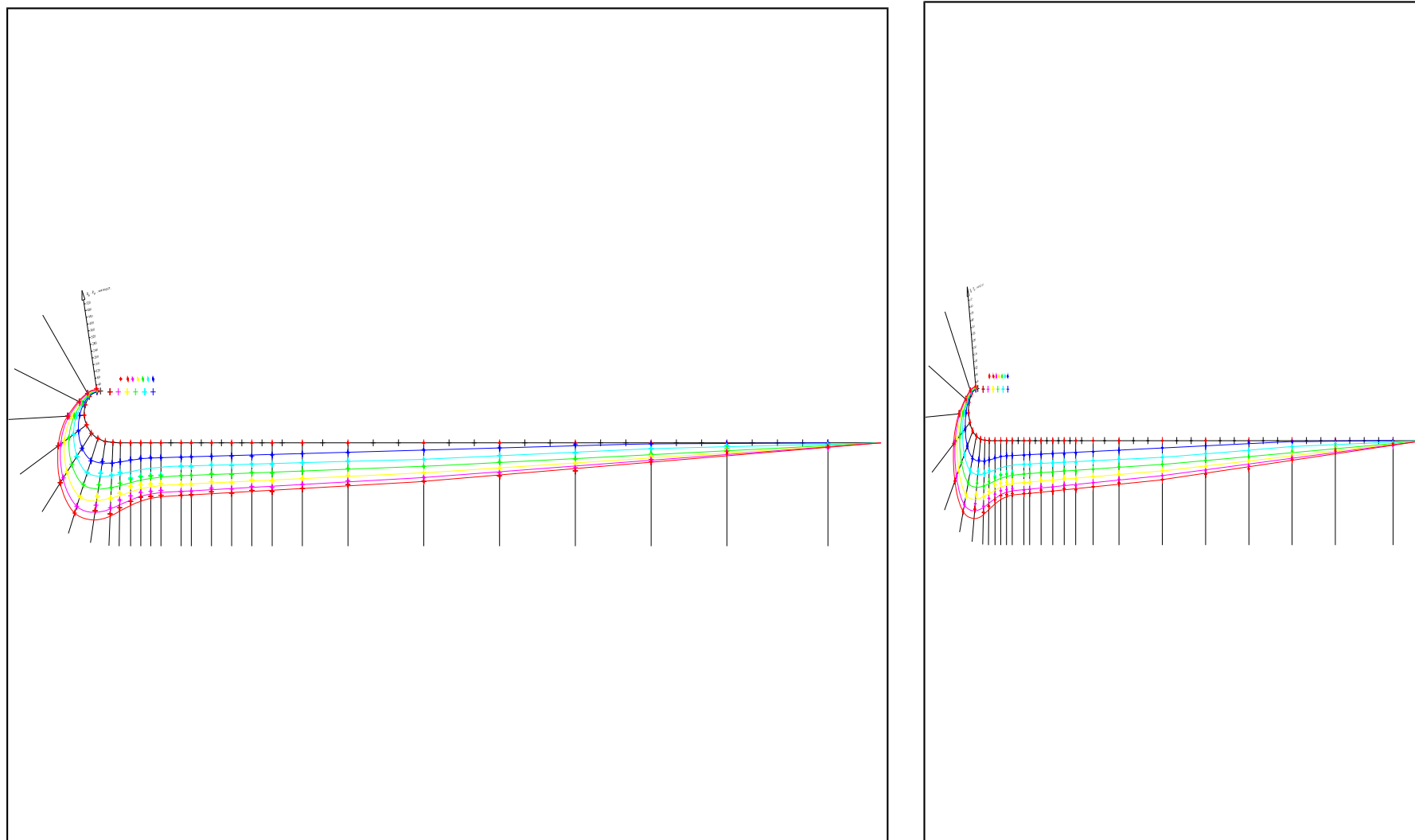
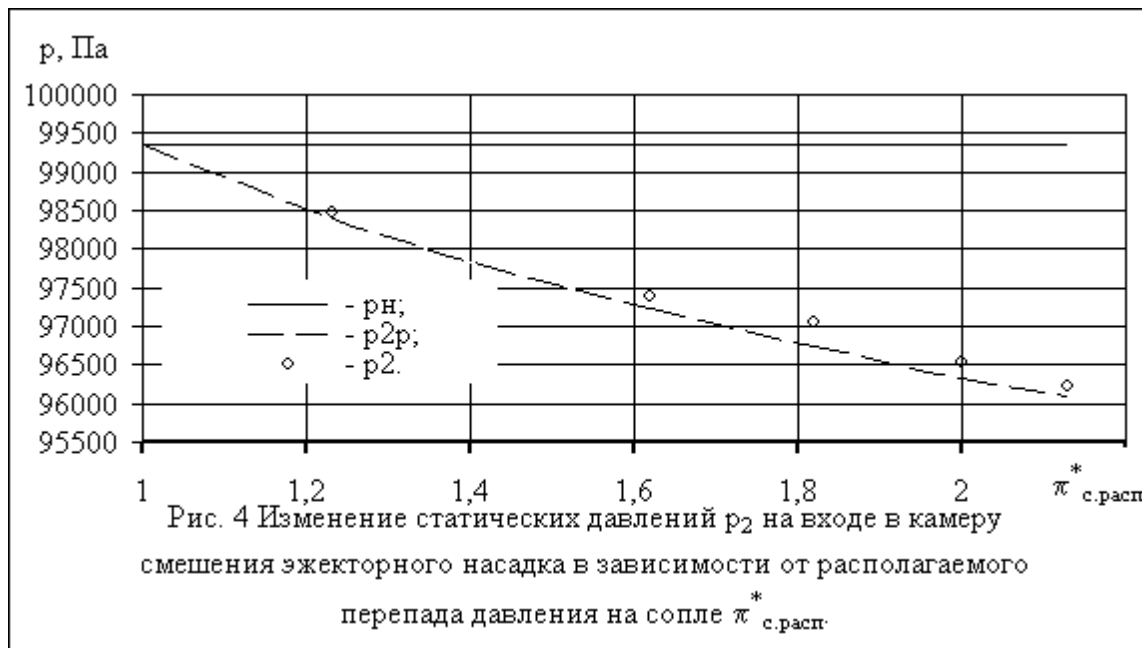


Рис. 3. Распределение статических давлений  $p_{0i}$  по длине эжекторного насадка.



Увеличение тяги при подсасывании внешнего воздуха к эжектирующей струе объясняется тем, что на элементах эжектора возникают дополнительные силы, равнодействующая которых, направленная по оси потока, суммируется с реактивной тягой сопла.

Сила внешнего давления  $P_2$ , действующая на входной растроб (лемнискату) эжектора определялась путем суммирования осевых сил

$P_{2_i}$ , возникающих в результате действия разности давлений на все элементарные участки разбиения площади лемнискаты, нормальной к

оси потока:

(1)

$$P_2 = \sum_{i=1}^n P_{2_i}$$

где осевая сила  $P_{2_i}$ , [Н], действующая на элементарный участок, площадью  $F_{2_i} = \frac{\pi(D_{2_i}^2 - d_{2_i}^2)}{4}$ , [м<sup>2</sup>] ( $D_{2_i}$  и  $d_{2_i}$  – соответственно

внешний и внутренний диаметры элементарного кольца):

$$P_{2_i} = F_{2_i} (p_n - p_b) \quad (2)$$

Тяга сопла представляла сумму реактивной тяги  $P_c$  сопла и силы  $P_2$ :

$$P = P_c + P_2 \quad (3)$$

Тяговая характеристика сопла с ЭУТ, полученная в результате расчета по данному методу приведена на рис. 2. Величина тяги

$P = P_2 + P_c$  не отличается от данных прямых измерений [2], более чем на 1%.

Расход эжектируемого воздуха  $G_2$  рассчитали по известному перепаду давлений эжектируемого потока на входе в камеру смешения

ЭУТ:

$$G_2 = m q(\lambda_2) F_2 \frac{p_n}{\sqrt{T_2}} \quad (4)$$

где  $q(\lambda_2)$  – приведенная плотность тока, определенная по газодинамической функции  $\pi(\lambda_2) = \frac{p_n \sigma_{вх}}{P_2}$ ,  $\sigma_{вх}$  – коэффициент потерь

полного давления –  $\sigma_{вх} = 0,995$ ;  $F_2$ , [м<sup>2</sup>] – площадь эжектируемого потока на входе в смесительную камеру.

Суммарный расход воздуха через сопло с эжекторным насадком рассчитывался по формуле:

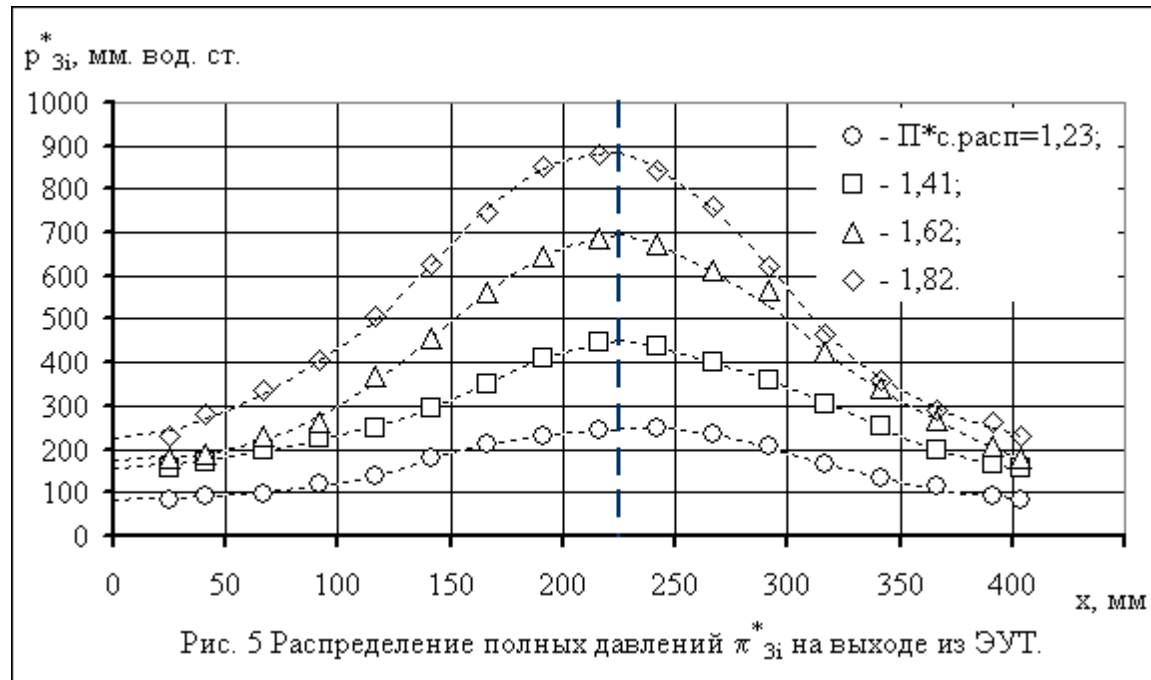
(5)

$$G_3 = G_c + G_2$$

Результаты расчетов расхода эжектируемого воздуха  $G_2$  и суммарного расхода воздуха через сопло с ЭУТ  $G_3$  приведены на рис. 1.

Измеренные распределения полных давлений  $p_{3i}$  на выходе из камеры смешения эжекторного усилителя тяги на режимах работы

$\pi_c = 1,23; 1,41; 1,62; 1,82$  представлены на рис. 5.



По распределению полных давлений на выходе из эжекторного насадка  $P_{3i}^i = f(r)$  были построены поля скоростей истечения потока

$$C_{3i} = a_{кр} \lambda_{3i} = 18,3 \sqrt{T_6^i} \lambda_{3i}, \quad (6)$$

где  $\lambda_{3i}$  – приведенная скорость потока, которую находили по газодинамической функции

$$\pi(\lambda_{3i}) = \frac{P_n}{P_{3i}^i}$$

Расход воздуха  $G_3$  и выходной импульс модели  $P$  определяли интегральным методом по формулам:

$$G_3 = \sum_{i=1}^n G_{3i} = \sum_{i=1}^n m q(\lambda_{3i}) F_{3i} \frac{P_{3i}^i}{\sqrt{T_6^i}}, \quad (7)$$

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n G_{3i} C_{3i}, \quad (8)$$

где  $n$  – количество элементарных участков разбиения площади выходного сечения эжекторного насадка;

$$F_{3i} = \frac{\pi(D_{3i}^2 - d_{3i}^2)}{4}, \quad [m^2] -$$

площадь элементарного участка разбиения;  $D_{3i}$  и  $d_{3i}$  – внешний и внутренний диаметры элементарного участка разбиения.

Массу присоединенного эжектором воздуха  $G_2$  рассчитывали как разность

$$G_2 = G_3 - G_c$$



Зависимость расхода воздуха через сопло с эжекторным насадком  $G_3$ , а также изменение присоединенной массы воздуха  $G_2$  в функции располагаемого перепада давления  $\pi_c^i$ , рассчитанные этим методом приведены на рис. 1. Значения величин выходного импульса

$P$  для различных  $\pi_c^i$  показаны на рис. 2.

Сравнительный анализ результатов обработки экспериментальных данных показал, что зависимости расходов эжектируемого воздуха  $G_2$  и суммарного расхода воздуха  $G_3$  через сопло с эжекторным насадком от располагаемого перепада давления на сопле  $\pi_c^i$ , полученные различными методами, незначительно отличаются друг от друга. Некоторое отличие объясняется погрешностями измерений и методов обработки экспериментальных данных.

Зависимости  $P = f(\pi_c^i)$ , рассчитанные независимыми методами, удовлетворительно согласуются между собой и зависимостью, полученной на основе прямых измерений тяги.

На рис. 1 и 2 приведены также расчетные расходная  $G_{2p}$ ,  $G_{3p} = f(\pi_c^i)$  и тяговая  $P_p = f(\pi_c^i)$  характеристики.

Расход эжектируемого воздуха  $G_{2p}$ , суммарный расход воздуха  $G_{3p}$  и тягу  $P_p$  сопла с ЭУТ определили на основе данных расчета расхода  $G_c$  эжектирующего воздуха и тяги  $P_c$  простого суживающегося осесимметричного сопла, полученных в работе [1], по соотношениям:

(9)

$$\begin{aligned} G_{2p} &= n_p \cdot G_c, \\ G_{3p} &= G_c + G_{2p}, \\ P_p &= \delta_p \cdot P_c, \end{aligned}$$

где  $n_p$  – расчетный коэффициент эжекции –

$$n_p = \frac{f \left( 1 + \frac{1}{\alpha} \right) \sqrt{2\alpha + \alpha^2 (f^2 - 1) + (1 + \alpha^2 f^2) \omega^2} - 1 - f^2}{1 + \alpha^2 f^2};$$

(10)

$\delta_p$  – расчетный коэффициент увеличения тяги –

$$\delta_p = \frac{1}{\sqrt{1 - \alpha^2 n_p^2 + \omega^2} - \omega} \left[ \frac{1}{f} \frac{\alpha}{\alpha + 1} (n_p + 1)^2 - (n_p + 1) \omega \right];$$

(11)

$\alpha$ ,  $f$  и  $\omega$  – безразмерные величины:

$$\alpha = \frac{F_c}{F_2}, \quad f = \frac{F_4}{F_c + F_2}, \quad \omega = \frac{\omega_n}{\omega_c} \quad [3];$$

$F_c$  – площадь выходного сечения эжектирующего сопла, [м<sup>2</sup>];

$F_4$  – площадь выходного сечения диффузора, [м<sup>2</sup>].

Для исследуемого ЭУТ без диффузора ( $f = 1$ ), при работе двигателя на месте ( $\omega = 0$ ) формулы (10) и (11) примут вид:

(12)

$$n_p = \frac{\left( \frac{\alpha + 1}{\alpha} \right) \sqrt{2\alpha} - 2}{1 + \alpha^2},$$

$$\delta_p = \frac{\alpha}{\alpha+1} \frac{(n_p+1)^2}{\sqrt{1-\alpha^2 n_p^2}}$$

Расходные характеристики  $G_2$ ,  $G_3 = f(\pi_c^i)$ , полученные по экспериментальным данным лежат ниже расчетных зависимостей

$G_{2p}$ ,  $G_{3p} = f(\pi_c^i)$ , что говорит о том, что эжектор работает не на полной мощности, его эжекционные способности не исчерпаны до

конца. Такой результат можно объяснить меньшей длиной камеры смешения ( $(l/d)_{\text{эксн}} = 6,7$ ) по сравнению с длиной ( $(l/d) = 10 \div 12$ ),

которая требуется для достижения полного выравнивания параметров в выходном сечении ЭУТ [3]. Поля полных давлений  $P_{3i}^i$  на выходе

из эжектора подтверждают данное предположение (см. рис. 5).

Зависимости  $P = f(\pi_c^i)$ , рассчитанные косвенными независимыми методами, удовлетворительно согласуются между собой и

зависимостью, полученной на основе прямых измерений тяги [2], а также в области дозвуковых перепадов давления  $\pi_c^i$  в сопле

приближаются к расчетной зависимости

$$P_p = f(\pi_c^i)$$

Сравнение тяговых характеристик сопла с ЭУТ  $P = f(\pi_c^i)$  и эжектирующего сопла  $P_c = f(\pi_c^i)$  (рис. 2) показало, что использование

эжекторного насадка дает возможность значительно увеличить тягу сопла.

Эффективность применения эжекторного насадка с точки зрения его эжекционных свойств и выигрыша в тяге можно оценить, определив коэффициенты эжекции  $n$  и увеличения тяги  $\delta$ .

Коэффициент эжекции  $n$  рассчитали как отношение расхода эжектируемого воздуха  $G_2$  к расходу воздуха через активное сопло  $G_c$  :

$$n = \frac{G_2}{G_c}$$

(14)

Зависимость коэффициента эжекции  $n$  от располагаемого перепада давления на сопле  $\pi_c^*$  показана на рис. 6.



Кроме коэффициентов эжекции  $n$ , рассчитанных по опытным данным, на рис. 6 приведена зависимость расчетного коэффициента

эжекции  $n_p$  в функции  $\pi_c^*$ , который определили по формуле (12).

Расчетный коэффициент эжекции  $n_p$  не зависит от располагаемого перепада давления на сопле  $\pi_c^i$  и является функцией только геометрического параметра  $\alpha$ . При  $\alpha=0,042$  расчетный коэффициент эжекции  $n_p$  составил  $n_p=5,21$ .

В исследуемой области изменения располагаемого перепада давлений на сопле  $\pi_c^i$  коэффициент эжекции  $n$  лежит ниже расчетного  $n_p$ :  $n < n_p=5,21$ . Как было показано выше, это связано с выбранной длиной камеры смешения.

Зависимость коэффициента увеличения тяги  $\delta = \frac{P}{P_c}$  от располагаемого перепада давления на сопле  $\pi_c^i$  показана на рис. 7.

Из рисунка видно, что коэффициенты увеличения тяги  $\delta$ , полученные при обработке экспериментальных данных для всего диапазона

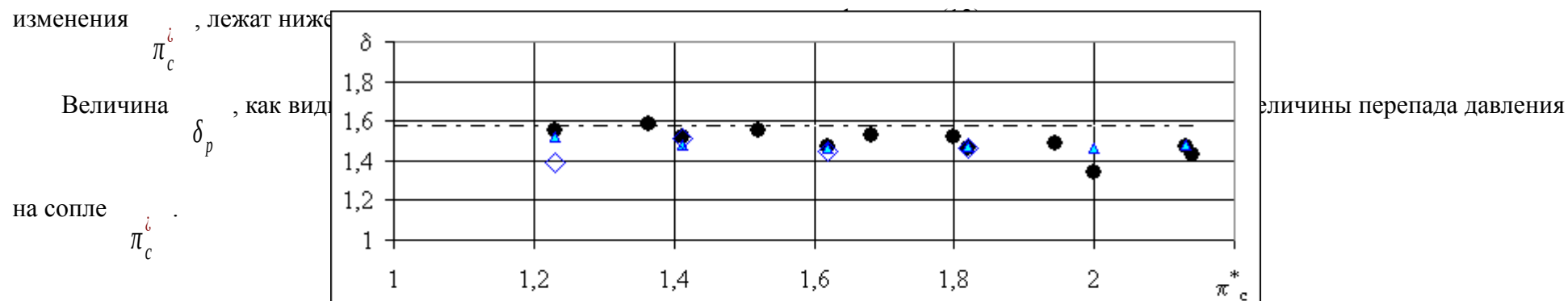


Рис. 8 Зависимость коэффициента увеличения тяги  $\delta$  от действительного перепада давления на сопле  $\pi_c^*$

- - по данным прямых измерений тяги  $P$  сопла с ЭУТ;
- ▲ - по данным расчета  $P$  как суммы  $P_c+P_2$ ;
- ◇ - в по данным расчета  $P$  по распределению полных давлений  $p^*Z_i$  на выходе из ЭУТ;
- $\delta_p$

Рис.7

### **Список литературы**

1. Голубев В.А., Крылов Б.А., Монахова В.П. Исследование эжекторных усилителей тяги (ЭУТ). // Теория воздушно-реактивных двигателей и их элементов. Тематический сборник трудов научно-методической конференции, посвященной 60-летию кафедры “Теория воздушно-реактивных двигателей” МАИ. Москва, МАИ, 2005. – 73-80 с.
2. Голубев В.А., Монахова В.П. Экспериментальное определение характеристик эжекторных усилителей тяги (ЭУТ). // Теория воздушно-реактивных двигателей и их элементов. Тематический сборник трудов научно-методической конференции, посвященной 60-летию кафедры “Теория воздушно-реактивных двигателей” МАИ. Москва, МАИ, 2005. – 86-91 с.
3. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1969. – 824 с.

---

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

*Голубев Виктор Андреевич, профессор кафедры “Теория воздушно-реактивных двигателей ” Московского государственного авиационного института (технического университета), к.т.н.*

*Монахова Вероника Павловна, старший преподаватель кафедры “Метрология, стандартизация, сертификация” Московского государственного авиационного института (технического университета).*