

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт им. С.П.Королева

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОПЕЛ ЛАВАЛЯ
НА ОСНОВЕ ИСПЫТАНИЯ ИХ МАЛОРАЗМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Куйбышев 1982

УДК 533.011.55 + 532.525

Излагается методика проведения учебно-исследовательских работ по экспериментальному определению интегральных характеристик сопел Лавала на основе использования малоразмерных моделей этих сопел.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 0538 (курс "Теория ДЛА")

Утверждено на редакционно-издательском совете
института

1. ОСОБЕННОСТИ ГАЗОДИНАМИКИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ СОПЕЛ ЛАВАЛЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК

1.1. Область применения малоразмерных сопел Лаваяля

В настоящее время в различных областях науки и техники широкое применение находят малоразмерные сопла Лаваяля.

Эти сопла наряду с камерой сгорания являются основным элементом ракетных двигателей малой тяги (РДМТ) которые используются в активных системах ориентации и стабилизации летательных аппаратов [4] .

В газодинамических лазерах малоразмерные сопла Лаваяля используются для создания инверсии населенностей колебательных энергетических уровней молекул, что позволяет получать когерентное излучение большой мощности в непрерывном режиме работы [5] .

Эти сопла используются также в качестве источников молекулярных пучков, при разделении изотопов, создании сверхтонких пленок в радиоэлектронной промышленности, в малолуменных аэродинамических трубах и аэродинамических трубах малой плотности, в сопловых аппаратах микротурбин [6,7,8] .

Использование малоразмерных сопел для моделирования различных газодинамических процессов позволяет резко снизить стоимость газодинамического эксперимента и сократить сроки его проведения с одновременным повышением точности получаемых результатов

1.2. Основные расчетные зависимости для определения интегральных параметров сопел Лаваяля при идеальном течении

Расчетные зависимости, необходимые для определения расхода, тяги, удельного импульса и тягового комплекса сопел Лаваяля, выво-

дятся на базе использования определенной газодинамической модели течения.

При использовании простейшей модели одномерного течения невязкого и нетеплопроводного газа расчетные зависимости можно получить в виде простых аналитических формул [1,4].

Расход газа через сопло в этом случае определится по формуле:

$$\dot{m}_{уд} = \frac{p_0 \cdot F_*}{\sqrt{R_r \cdot T_0}} \cdot \sqrt{\kappa \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} \quad (1.1)$$

Эту формулу удобно использовать в виде:

$$\dot{m}_{уд} = a \frac{p_0 \cdot F_*}{\sqrt{T_0}} \quad (1.2)$$

где

$$a = \sqrt{\frac{\kappa}{R_r} \cdot \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} \quad (1.3)$$

- множитель, зависящий только от физической природы газа.

В частности, для воздуха $a = 0.03963 \left[\frac{\text{с}}{\text{м}} \cdot \kappa^{1/2} \right]$

Тяга в пустоте определится по формуле:

$$P_{уд} = p_0 \cdot F_* \cdot \kappa \sqrt{\frac{2}{\kappa+1} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}} \left[1 - \pi(\lambda_a)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} + p_a \cdot F_a \quad (1.4)$$

Величины $\pi(\lambda_a) = \frac{p}{p_0}$ и p_a определяются по газодинамическим функциям через известное отношение площадей $\frac{F_*}{F_a}$.

Зависимость (1.4) удобно использовать в виде:

$$P_{уд} = K_{P_n} \cdot p_0 \cdot F_* \quad (1.5)$$

где

$$K_{P_n} = \sqrt{\frac{2}{\kappa-1} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}} \left[1 - \pi(\lambda_a)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} + \frac{\pi(\lambda_a)}{q(\lambda_a)} \quad (1.6)$$

тяговый комплекс в пустоте

Используя (I.2) и (I.5), формулу для величины удельного импульса в пустоте можно записать так:

$$J_{y, n_{\infty}} = \frac{P_{n_{\infty}}}{m_{n_{\infty}}} = \frac{K P_{n_{\infty}}}{a} \sqrt{T_0} \quad (I.7)$$

Важное значение приведенных выше формул состоит в том, что они позволяют определить значения параметров в идеальном случае, т.е. дают предельно достижимые значения параметров.

I.3. Особенности газодинамики малоразмерных сопел Лаваля

Реальная картина течения в соплах Лаваля отличается от идеальной, поэтому и действительные параметры сопел могут значительно отличаться от идеальных.

Это отличие обусловлено тем, что в действительности течение в соплах Лаваля является двумерным, а газ - вязким, при этом количественная сторона эффектов, обусловленных двумерностью и вязкостью, зависит от формы контура сопла и параметров газа на входе сопла.

Рассмотрим влияние двумерного характера течения на величину расхода газа через сопло и удельный импульс.

Влияние двумерного характера течения на величину расхода газа через сопло обусловлено криволинейностью звуковой линии в минимальном сечении сопла и неравномерностью поля скоростей в поперечном направлении.

В соплах с радиусной формой трансзвуковой части сопла неравномерность поля скоростей в минимальном сечении сопла, обусловленная криволинейностью звуковой линии, и вызывающая уменьшение расхода, зависит от безразмерного радиуса $\bar{R}_* = \frac{R_*}{z_*}$ (рис.I.I), а в соплах с $\bar{R}_* = 0$ - от угла θ_1 [3].

На рис.I.2 показана схема течения невязкого газа в профили-

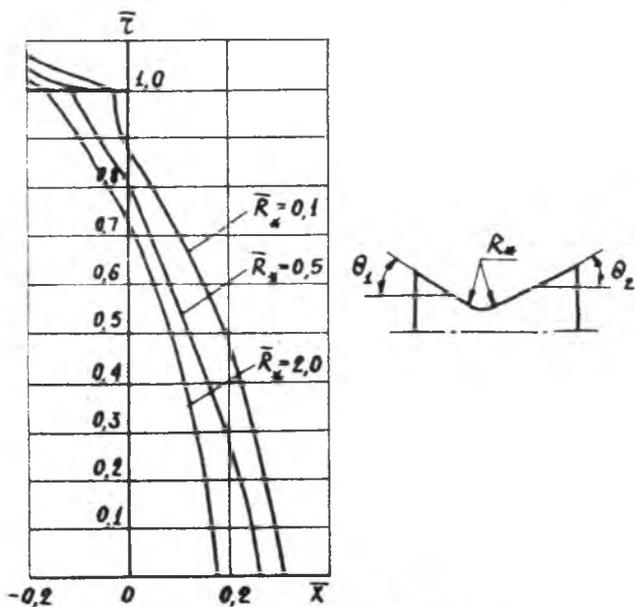


Рис. 1.1. Влияние радиуса \bar{R}_* на положение звуковой линии для сопла Лаваля.

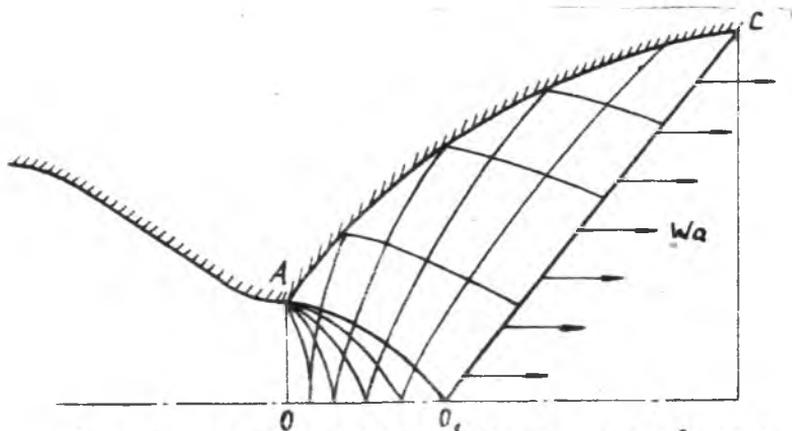


Рис. 1.2. Схема течения в профилированной сверхзвуковой части сопла Лаваля

рованной сверхзвуковой части осесимметричного сопла Лавала с угловой точкой A [3].

Область AO_1 рассчитывается методом характеристик, в этой области происходит разгон потока в виде волны разрежения, исходящих из т.А, на характеристике AO_1 достигается заданное число Маха M_a . В области AO_1C решением задачи Гурса определяется контур сопла АС, обеспечивающий равномерный поток на срезе, при котором вектор скорости W_a параллелен оси сопла.

Заметим, что несмотря на одномерный характер потока на выходе из сопла, течение внутри сопла в области AO_1C является существенно двумерным.

Контур сопла с равномерной характеристикой O_1C на практике необходимо укорачивать, так как касательные напряжения трения создадут силу, противоположную тяге, и, поскольку концевой участок контура почти параллелен оси, приращение на нем сил трения оказывается большим, чем приращение импульса сопла за счет сил давления.

Кроме того, сопло укорачивают, исходя из соображений компоновки и уменьшения веса сопла.

Поэтому в реальных соплах с укороченной профилированной сверхзвуковой частью сопла течение на срезе сопла отличается от одномерного, что приводит к потерям удельного импульса, которые называются потерями на рассеяние.

В соплах с конической сверхзвуковой частью сопла течение также отличается от одномерного. Обычно это отличие учитывается с помощью использования модели, в которой считается, что в коническом сопле реализуется течение от источника.

В рамках этой модели потери на рассеяние определяются по формуле [1]:

$$\zeta_p = \frac{1}{2} \sin^2 (\theta_2/2) \quad (1.8)$$

Реальное течение не соответствует модели течения от источника, т.к. в окрестности точки сопряжения радиусного и конического участков сопла возникает виская ударная волна, интенсивность которой увеличивается по мере приближения к оси симметрии [3].

Отражение этой волны от оси симметрии и от стенок сопла приводит к значительной неравномерности параметров потока в поперечном направлении, зависящей в основном от угла θ и расстояния от минимального сечения сопла (рис.1.3). Потери на рассеяние при этом имеют колебательный характер и могут значительно отличаться от асимптотического значения, даваемого формулой (1.3) (рис.1.4).

В характерном для малоразмерных сопел Лавала диапазоне чисел Рейнольдса ($Re_* = 10^2 - 10^5$) существенное влияние на течение оказывает вязкость. Физически ее влияние проявляется в нарастании пограничного слоя по длине сопла, что приводит к уменьшению расхода через сопло и удельного импульса.

На рис.1.5 показано изменение толщины пограничного слоя по длине сопла при $Re_* = 10^3$ и $Re_* = 10^5$. Контур его соответствует соплу, экспериментально исследованному в [9].

На рис.1.6 показано влияние вязкости на поперечный профиль числа Маха в сечении I-I, указанном на рис.1.5.

Расчеты, результаты которых приведены на рис.1.5 и 1.6, проведены на ЭВМ типа ЕС по методике, разработанной в лаборатории микроэнергетики КуАИ [10].

Характерное уменьшение толщины пограничного слоя в трансзвуковой части сопла обусловлено большими отрицательными градиентами давления в продольном направлении.

Результаты, приведенные на рис.1.5 и 1.6, показывают, что пограничный слой в сверхзвуковой части сопла занимает значительную часть поперечного сечения, а реальный профиль чисел Маха

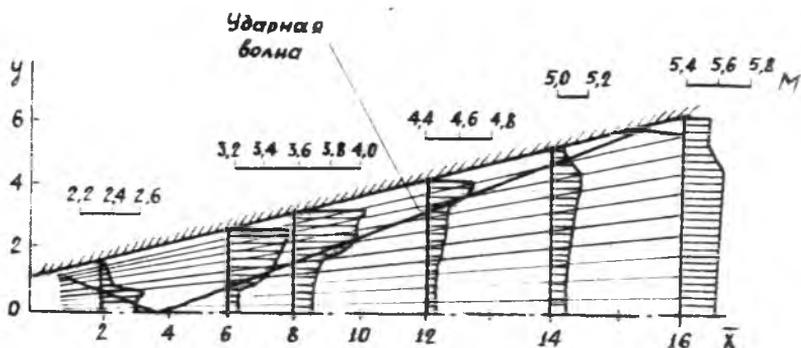


Рис. 1.3. Распределение чисел Маха по сечениям, положение ударных волн и линий тока в коническом сопле ($\theta_2 = 15^\circ$, $\kappa = 1.4$)

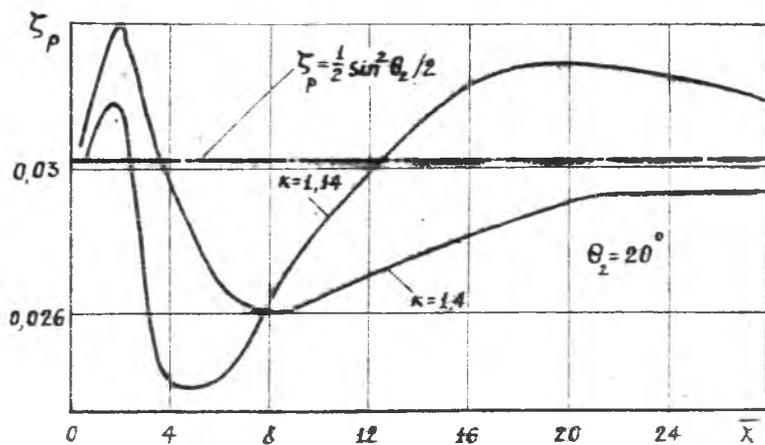


Рис. 1.4. Зависимость коэффициента потерь удельного импульса из-за рассеяния в коническом сопле по его длине

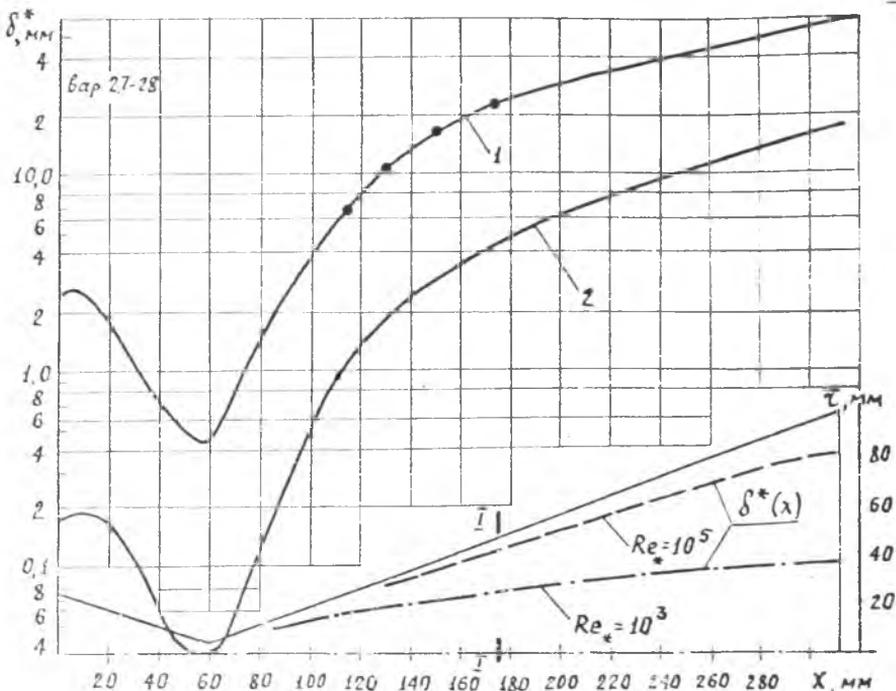


Рис. 1.5. Изменение толщины пограничного слоя по длине сопла (с - эксперимент [9] при $Re_* = 10^3$; 1 - расчет [10] при $Re_* = 10^3$; 2 - расчет [10] при $Re_* = 10^5$, $\alpha_2 = 21.7^\circ$, $K = 1.4$)

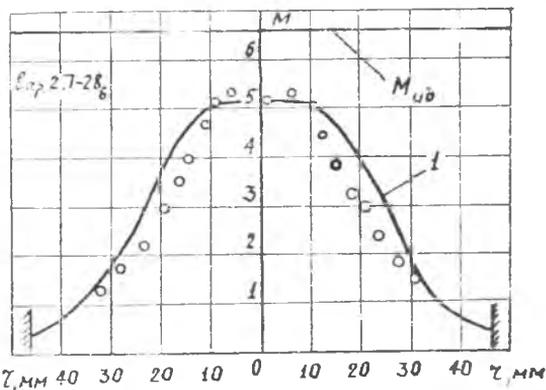


Рис. 1.6. Поперечный профиль числа Маха в сечении I-I по рис. 1.5 (с - эксперимент [9], 1 - расчет [10])

(как и других параметров потока) существенно отличается от значений полученного по одномерному невязкому расчету.

В настоящее время отсутствуют расчетные методы, позволяющие с достаточной точностью определить совместное влияние вязкости и двумерности на расход, тягу и другие интегральные параметры малоразмерных сопел Лавала, поэтому степень отличия действительных параметров от идеальных определяется экспериментально с помощью системы коэффициентов, основными из которых являются коэффициент расхода μ_c , коэффициент сопла φ_c и коэффициент полноты тягового комплекса $\varphi_{K_{P_n}}$.

Эти коэффициенты определяются следующим образом:

$$\mu_c = \frac{m_{\text{эксп}}}{m_{\text{ид}}} \quad (\text{I.9})$$

$$\varphi_c = \frac{J_{y.p. \text{эксп}}}{J_{y.p. \text{ид}}} \quad (\text{I.10})$$

$$\varphi_{K_{P_n}} = \frac{K_{P_n \text{эксп}}}{K_{P_n \text{ид}}} \quad (\text{I.11})$$

С учетом (I.5), (I.9) и (I.10) формулу (I.11) можно записать в следующем виде:

$$\varphi_{K_{P_n}} = \frac{P_{\text{эксп}}}{P_{\text{ид}}} = \frac{J_{y.p. \text{эксп}} \cdot m_{\text{эксп}}}{J_{y.p. \text{ид}} \cdot m_{\text{ид}}} = \varphi_c \cdot \mu_c \quad (\text{I.12})$$

1.4. Особенности экспериментального определения характеристик малоразмерных сопел Лавала

Особенностями газодинамического эксперимента, связанного с определением характеристик сопел Лавала, являются высокие требования к точности получаемых результатов и сложность используемого оборудования.

Высокие требования к точности эксперимента при исследовании

сопел РДМТ обусловлены тем, что скорость истечения из сопла определяет важнейший параметр, характеризующий экономичность рабочего процесса – удельный импульс тяги. При измерениях удельного импульса тяги требуемая точность его определения составляет обычно доли процента [11]. Однако далеко не всегда в эксперименте удается достигнуть такой точности. В частности, погрешность определения удельного импульса РДМТ тягой около 1 Н составляет 1,5–2%, а по мере уменьшения тяги погрешность еще более возрастает.

Сложность используемого в эксперименте оборудования вызвана необходимостью имитации высотных условий с тем, чтобы обеспечить безотрывный характер течения в сопле, что вызывает необходимость использования вакуумных камер. Кроме того, необходимость измерения малых по величине усилий и расходов, а также необходимость исследования структуры течения в соплах с небольшими геометрическими размерами во многих случаях не позволяет использовать стандартные измерительные методы и требует разработки уникальных измерительных систем.

Высотный газодинамический стенд [12], созданный в лаборатории микроэнергетики КуАИ для исследования малоразмерных сопел, оснащен необходимыми измерительными системами и позволяет с высокой точностью определять экспериментально характеристики, описанные выше.

Получение практических навыков, связанных с проведением исследований на этом стенде, является общей целью проведения описанных ниже учебно-исследовательских лабораторных работ.

Конкретные цели проведения каждой из лабораторных работ излагаются в соответствующих разделах методических указаний.

2. ВЫСОТНЫМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОРАЗМЕРНЫХ СОПЕЛ ЛАВАЛ

2.1. Вакуумная система стенда

Принципиальная схема стенда представлена на рис.2.1.

Основу стенда представляет вакуумная камера 7, разрежение в которой создается вакуумными механическими насосами с масляным уплотнением ВН-6Г 21,23,25,27, связанными с камерой 7 вакуумированием 18,17,19 через систему вакуумных затворов 18,20,22,24, 26,29 и задвижек 31,32. Такая система обеспечивает плавную регулировку разрежения в вакуумной камере в соответствии с расходом через сопло. Кроме того, вакуумная камера через специальный вентиль (на рисунке не указан) может быть сообщена с атмосферой.

Вакуумная камера 7 конструктивно выполнена в виде коробки прямоугольного сечения, сваренной из листовой стали. Передняя стенка камеры съемная и выполнена из оргстекла, что дает возможность наблюдать за весовым устройством 9,17. В боковые стенки камеры вмонтированы две шкловые камеры 11,34, предназначенные для загрузки грузовой тарелки 14 тягоизмерительного устройства без разгерметизации вакуумной камеры.

Система откачки вакуумной камеры позволяет поддерживать в последней пониженное по сравнению с атмосферным давление при стационарном расходе через исследуемое сопло. Степень разреженности определяется секундным расходом газа через сопло и количеством подключенных к вакуумной камере насосов.

Экспериментально определенная зависимость давления в вакуумной барокамере при различных расходах газа через сопло и числе подключенных насосов показана на рис.2.2. Эта зависимость позволяет либо по заданным величинам $P_{6к}$ и η определить

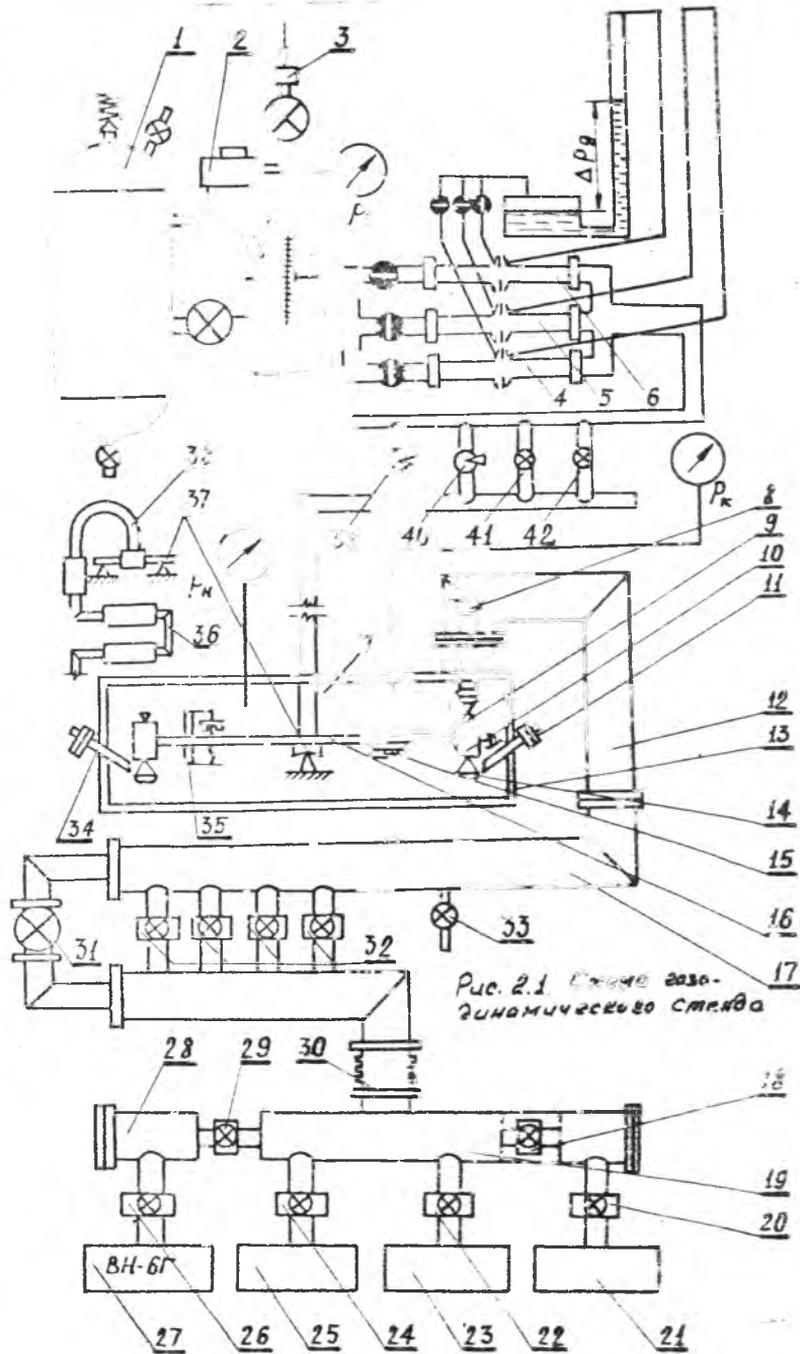


Рис. 2.1 Схема газодинамического стенда

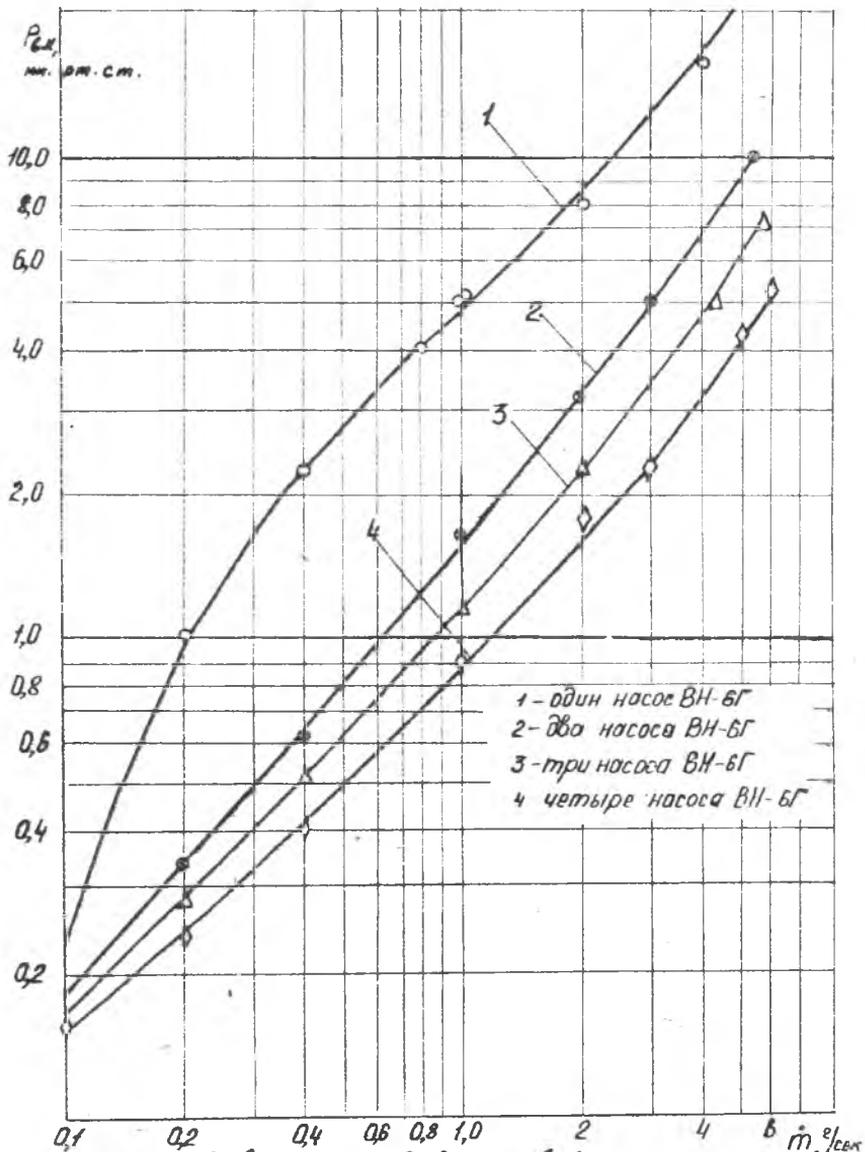


рис. 2.2. Зависимость давления в вакуумной камере от массового расхода рабочего тела при различном числе включенных вакуумных насосов.

такое \bar{F}_a , при котором еще обеспечивается безотрывный режим течения, либо по заданной величине \bar{F}_a определить секундный расход, при котором давление на срезе сопла не становится меньше, чем давление в вакуумной камере.

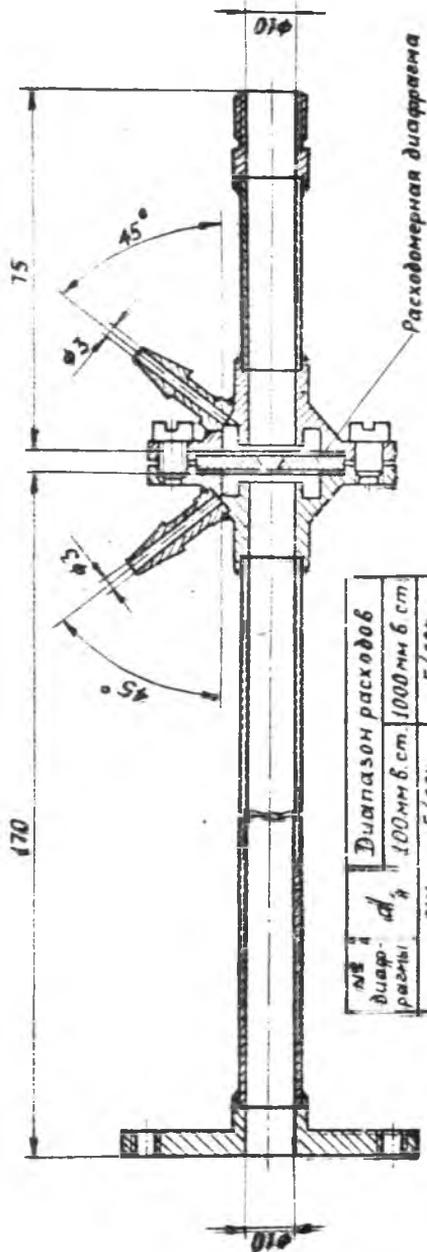
2.2. Система подачи рабочего тела и измерения его расхода

Система подачи рабочего тела представляет собой магистраль с многократным дросселированием газа высокого давления. Эта магистраль присоединяется к сети сжатого воздуха с давлением около 25 МПа (250 кг/см²).

При этом сжатый воздух через редуктор 2 (рис.2.1) подается в ресивер низкого давления 1. Ресивер необходим для демпфирования колебаний воздуха в магистрали высокого давления. Давление в ресивере может регулироваться в диапазоне от 0,2 до 1 МПа. Из ресивера газ через одно из расходомерных устройств 4,5,6 попадает к системе вентилях 39-42 и далее попадает в камеру исследуемого сопла. Система вентилях 39-42 необходима в широком диапазоне его изменения от 0,005 до 5 г/сек.

Расходомерное устройство состоит из трех сменных блоков 4,5,6. Конструкция каждого из этих блоков идентична и представлена на рис.2.3. Отличаются эти блоки друг от друга диаметром размещенной в каждом из них расходомерной диафрагмы. Каждый из блоков соединен с пьезометром для замера перепада Δp_d на расходомерной диафрагме и манометром для замера давления p_d перед диафрагмой (рис.2.1). Кроме того, на входе в каждый из блоков диафрагм производится замер температуры T_d .

Использование расходомерных диафрагм для измерения в широком диапазоне весьма малых расходов обладает такими преимуществами, как весьма высокая чувствительность к изменению расхода и срав-



№ в двар- рассы	Диапазон расходов	
	мм.	г/сек.
1	0,10	0,001
2	0,24	0,005
3	0,61	0,027
4	1,08	0,092
5	1,53	0,184
6	2,39	0,353
7	4,30	1,47
8	5,46	2,7

Рис. 2.5. Конструкция измеренной расходомерной диафрагмы

нительная простота замера расхода.

Известно, что расход газа через диафрагму, имеющую площадь проходного сечения F_2 , определяется зависимостью:

$$\dot{m} = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_2 \cdot \sqrt{2 \Delta p_2 \cdot \frac{\rho_2}{T_2}} \quad (2.1)$$

где α - коэффициент расхода диафрагмы;

Δp_2 - перепад давления на диафрагме;

ρ_2 - давление газа на входе в диафрагму;

T_2 - температура на входе в диафрагму;

ε - поправочный множитель, учитывающий сжимаемость газа.

Для стандартных нормализованных диафрагм коэффициент расхода можно определить по следующей зависимости

$$\alpha = \alpha_0 \cdot k_{Re} \cdot \zeta_w \cdot k_0 \cdot k_t \quad (2.2)$$

где α_0 - коэффициент расхода при нормальных условиях;

k_{Re} - поправка на вязкость при малых числах Рейнольдса;

ζ_w - поправка на шероховатость;

k_0 - поправка на остроту кромки;

k_t - поправка на температурное расширение диафрагмы.

Поскольку для нормализованных диафрагм разработаны надежные методы определения поправок k_{Re} , ζ_w , k_0 и k_t , то коэффициент расхода для них с достаточной точностью может быть определен расчетным путем.

Однако в настоящее время нормализованы лишь диафрагмы для измерения больших расходов газа с диаметром проходного сечения не менее 50 мм, а для замера расходов в данной работе диаметр проходного сечения диафрагм находится в диапазоне от 0,1 мм до 5 мм.

Поэтому для использования таких диафрагм необходима их инди-

видуальная тарировка, цель которой - экспериментальное определение коэффициента расхода каждой из диафрагм.

Тарировка диафрагм для измерения малых расходов газа с высокой точностью сама по себе является сложной задачей.

Рассмотрим способ тарировки диафрагм весовым методом, при котором расход газа через диафрагму, прошедший в течение определенного промежутка времени, определяется его взвешиванием.

Принципиальная схема экспериментальной установки, необходимой для такой тарировки и созданной в лаборатории № 2 КуАИ, показана на рис.2.4.

Установка состоит из шар-баллона 6, в котором находится рабочее тело; редуктора 7, регулировочного вентиля 8, ресивера II для измерения температуры T_0 перед тарированной диафрагмой, блок 12 с тарированной диафрагмой, выходного вентиля 20 и электроклапана 19, управляющего расходом газа. Все эти элементы смонтированы в общий узел и подвешены на гибкой ленте 9.

Шар-баллон заправляется рабочим телом за счет присоединения его с помощью специального разьема 3 к пневмосети, после чего производится настройка диафрагмы на заданный режим (по давлению и перепаду на диафрагме $4P_0$) с помощью редуктора 7, вентиля 8 и 20. После этого шар-баллон отсоединяется от питающей магистрали и вся система приводится в равновесие с помощью стержневого уровня I4 и балансировочных грузов I5 и I6. В грузовую чашку 5 кладется гиря, равная весу газа, который будет израсходован в процессе тарировки. Затем открывается электроклапан I9 и одновременно включается секундомер, записываются показания температуры T_0 , давления P_0 и перепада $4P_0$ на диафрагме. Когда установка вновь пройдет положение равновесия (это контролируется по уровню I4) останавливается секундомер и выключается электроклапан, после чего по формуле

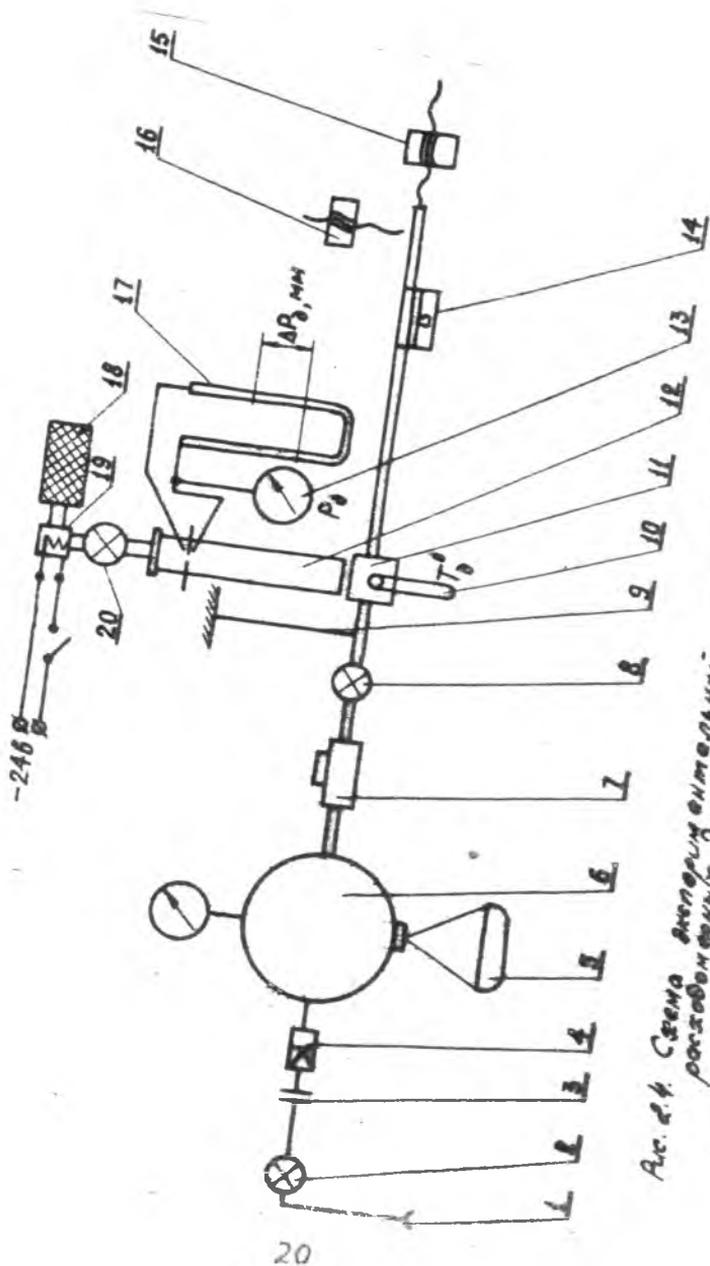


Рис. 24. Схема аппаратурной установки для торцевой разового вакуумного литья.

$$\alpha_{\text{зисп}} = 15.55 \frac{m_{\text{зисп}}}{d_2 \sqrt{\Delta p_2 \cdot \frac{\rho_2}{T_2}}} \quad (2.3)$$

определяется коэффициент расхода диафрагмы.

Величина измеряемого перепада давлений на диафрагме в описанном методе лежит в диапазоне от 100 до 1000 мм вод.ст. Нижняя граница этого диапазона обусловлена требованием к величине относительной погрешности определения величины Δp_2 (при $\Delta p_2 < 100$ мм вод.ст. эта погрешность становится недопустимо большой), верхняя граница обусловлена ограничением на вертикальный размер пьезометра. Коэффициент расхода $\alpha_{\text{зисп}}$ необходимо определять во всем используемом диапазоне перепада Δp_2 .

Расход газа через сопло с использованием расходомерной диафрагмы, коэффициент которой $\alpha_{\text{зисп}}$ определен заранее, находится по формуле

$$m_{\text{зисп}} = 0.06394 \cdot \alpha_{\text{зисп}} \cdot d_2 \cdot \sqrt{\Delta p_2 \cdot \frac{\rho_2}{T_2}} \quad (2.4)$$

В формулах (2.3) и (2.4)

$m_{\text{зисп}}$ - экспериментально измеренный расход через сопло,
г/с;

d_2 - диаметр проходного сечения расходомерной диафрагмы, мм;

Δp_2 - перепад давлений на расходомерной диафрагме,
мм вод.столба;

ρ_2 - давление газа перед расходомерной диафрагмой,
кг/см²;

T_2 - температура газа перед расходомерной диафрагмой, К

Отметим, что квадратичная зависимость перепада давления на диафрагме от расхода газа ограничивает диапазон расхода, измеряемый с помощью одной диафрагмы, в связи с чем для замера расхода

в указанном выше диапазоне от 0,005 до 5 г/сек необходимо использование 8 диафрагм. Их диаметр проходных сечений и измеряемый диапазон расходов указаны в таблице на рис. 2.3. Зависимость коэффициента расхода $\alpha_{жст}$ от перепада ΔP_D для этих диафрагм приведена на рис. 11-18 в приложении.

В процессе определения характеристик сопел Лавала при выполнении данной работы может возникнуть необходимость уточнения приведенных на рис. 11-18 зависимостей, а также тарировка расходомерных диафрагм с другими проходными сечениями в соответствии с изложенной выше методикой.

2.3. Система измерения тяги

Система измерения тяги представляет собой качающийся двуплечий рычаг 16, свободно опирающийся на игловые опоры (рис. 2.1). Сопловые камеры крепятся в конце плеч рычага. Подвод рабочего тела осуществляется через гибкий шланг к рычагу, который выполняется пустотелым.

Замер тяги, создаваемой соплом, производится нуль-методом с помощью гирь, помещаемых на грузовые тарелки 14, загрузка которых осуществляется через шлюзовые камеры 11, 34.

Чувствительность весоизмерительного устройства определяется трением в опорах и упругостью гибкого соединения (шланга). В качестве нуль-индикатора весового устройства используется спиртовый уровень 15, закрепленный на одном из плеч рычага. Порог чувствительности весового устройства составляет 10^{-4} Н, следовательно, предельная абсолютная погрешность из-за ошибки в установке рычага в положение равновесия также равна 10^{-4} Н.

Кроме ошибок, связанных с установкой рычага в положение равновесия, могут быть ошибки от неравномерности весового устройства

и отклонения оси сопловой камеры от Вертикали.

Погрешность от неравноплечности весового устройства является систематической и может быть учтена введением поправочного коэффициента. Для определения поправочного коэффициента производится измерение тяги одного и того же сопла последовательно на обоих сопловых камерах. Специально проведенный эксперимент показал, что эта погрешность не превышает 0,1 %.

Проверка показала также, что погрешностью от несовпадения оси камеры с вертикалью также можно пренебречь.

2.4. Система замера давлений на входе в сопло и в вакуумной камере

Схема измерения давлений на входе в сопло и в вакуумной камере показана на рис.2.5.

Для измерения давления на входе в сопло используются масляный и ртутный дифференциальные манометры, а также образцовые манометры, класса 0,4. Масляный дифманометр предназначен для измерения давления на входе в сопло в диапазоне от 10^{-3} МПа до 10^{-2} МПа. При абсолютной погрешности в отсчете ± 1 мм максимальная погрешность определения P составляет около 1,5%, а минимальная - не более 0,4%.

Ртутный дифманометр предназначен для измерения давлений в диапазоне от 10^{-2} МПа до 0,1 МПа, при этом погрешность измерения находится примерно в том же диапазоне, что и для масляного дифманометра.

Пружинный манометр используется при измерениях давлений на входе в сопло, превышающих атмосферное. При его использовании необходимо знать атмосферное давление, которое измеряется барометром.

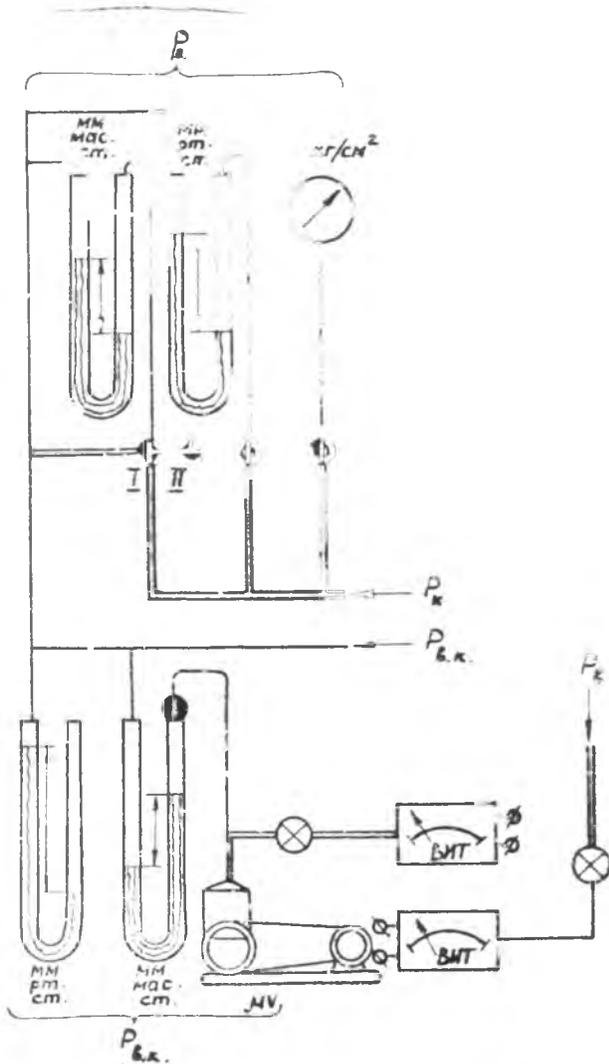


Рис. 2.5. Схема замера вакуумной P_0 и $P_{в.к.}$

Для измерения давления в вакуумной камере используется масляный дифманометр, одно колено которого соединено с пластинчато-роторным вакуумным насосом ВН-46I. Этот насос создает разрежение около 2 Па, так что в условиях проведения данной работы этим давлением по сравнению с давлением в вакуумной камере можно пренебречь и считать его равным нулю.

При этих условиях давление в вакуумной камере при $P_{\text{изм}} = 1$ мм рт.ст. измеряется с предельной погрешностью $\delta_{\text{изм}} = 13\%$.

Кроме того, для контроля давления в вакуумной камере замеряется вакуумметром ВИТ-I примерно с той же погрешностью.

2.5. Замер температуры на входе в сопло и перед расходомерной диафрагмой

При определении интегральных характеристик сопел Лавала на стационарном режиме необходимые для их определения измерения температуры на входе в сопло и перед расходомерной диафрагмой осуществляются образцовым ртутным термометром, имеющим предельную абсолютную погрешность 0,1 К, установленным перед входом в блок расходомерных диафрагм (рис.2.1).

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

3.1. Учебно-исследовательская лабораторная работа "Экспериментальное исследование коэффициента расхода малоразмерных сопел Лавала"

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Практическое ознакомление с методами экспериментального определения расхода через малоразмерные сверхзвуковые сопла, экспериментальное исследование влияния конструктивных и режимных факторов на коэффициент расхода этих сопел.

Экспериментальная установка позволяет проводить исследование сопел Лавала с диаметром минимального сечения от 0,5 мм до 3 мм в диапазоне давлений от 1 КПа до 0,5 МПа. При использовании в качестве рабочего тела воздуха при $T_0 = 300$ К этим параметрам соответствует примерный диапазон чисел Рейнольдса

$$10^2 \leq Re_* \leq 5 \cdot 10^5.$$

В этом диапазоне чисел Рейнольдса рекомендуется проведение следующих исследований, связанных с определением коэффициента расхода как осесимметричных, так и плоских сопел Лавала:

- 1). Исследование ^{влияния} числа Рейнольдса на коэффициент расхода сопел Лавала с фиксированной геометрией контура.
- 2). Исследование влияния до- и трансзвуковой части сопла на коэффициент расхода при различных числах Рейнольдса.
- 3). Исследование влияния формы сверхзвуковой части сопла и отношения давлений $p/p_{кр}$ на величину коэффициента расхода при различных числах Рейнольдса.
- 4). Исследование совместного влияния числа Рейнольдса и шероховатости стенок сопла в до- и трансзвуковой части на коэффициент расхода.

Лабораторная работа проводится в следующем порядке.

1. Изучается теория вопроса и экспериментальный газодинамический стенд для исследования характеристик малоразмерных сопел Лаваля.
2. В соответствии с задачей исследования, которая формулируется преподавателем, студентом составляется программа проведения эксперимента, в которой описывается:

- цель исследования,
- объект исследования с указанием формы контура сопла и его основных геометрических размеров,
- таблица режимов работы при проведении эксперимента, в которой указывается тип исследуемого сопла в каждом из опытов (если таких *типов* несколько), давление и температура на входе в сопло, диаметр проходного сечения расходомерной диафрагмы,
- технические условия, содержащие указания на число и тип одновременно работающих вакуумных насосов, величину давления в вакуумной камере, точность поддержания давления на входе в сопло и перед расходомерной диафрагмой и т.д.
- система измерений и регистрации параметров, в частности, указывается класс используемых манометров и диапазон измеряемых ими давлений.

Программа проведения эксперимента подписывается студентом и утверждается преподавателем, проводящим лабораторную работу.

3. В соответствии с режимами, указанными в программе, проводится эксперимент в следующем порядке:

- а) К подводящей магистрали и пьезометру замера перепада давлений на расходомерной диафрагме подсоединяется блок расходомерной диафрагмы с заданным диаметром проходного сечения.

Подсоединение осуществляется с помощью зажимов 39,40 (рис.2.1). Пневмосистема оснащается также манометрами P_0 и P_1 , имеющими класс точности и диапазон измерений, указанные в программе.

б) При закрытых вентилях 31 и задвижках 32 включаются вакуумные насосы ВН-6Г в соответствии с инструкцией по их запуску.

в) С помощью вентиля 39-42 устанавливается заданная величина на входе в сопло. Это осуществляется следующим образом.

При $P_0 > P_H$ в зависимости от расхода через сопло производится грубая настройка открытием вентиля 39 (при $m \geq 5$ г/с), 40 (при $0,5 \leq m \leq 5$ г/с), либо 41 (при $m \leq 0,5$ г/с). Окончательная настройка на заданную величину P_0 осуществляется с помощью игольчатого вентиля тонкой настройки 42.

При $P_0 < P_H$ сначала вентилям 31 обеспечивается предварительное разрежение в вакуумной камере, после чего устанавливается заданная величина P_0 с помощью вентиля 39-42.

Заданная величина $P_{г.к.}$ устанавливается изменением положения задвижек 32 и вентиля 31, при этом величина P_0 поддерживается на заданном уровне.

Величина $P_{г.к.}$ измеряется масляным дифманометром, который приводится в рабочее состояние следующим образом. При пережатых трубках, соединяющих одно колено дифманометра с вакуумным насосом, создающим опорное давление порядка 10^{-2} мм рт.ст. а другое — с вакуумной камерой, запускается опорный вакуумный насос. После этого полностью открываются задвижки 32 и вентиль 31, что обеспечивает разрежение в вакуумной камере $P_{г.к.} \leq 10$ мм рт.ст. и убирает зажим с трубок, идущих к коленам дифманометра.

Такой порядок необходим для того, чтобы предотвратить выброс масла из дифманометра.

г) Замеряются величины ρ_2 , ρ_2 , T_2 , ρ_2 , ρ_{2k} и записываются в протокол испытаний. Туда же записывается величина барометрического давления

д) По замеренным величинам определяется экспериментальная величина расхода через сопло $\dot{M}_{\text{жид}}$ по формуле (2.4), расход газа через сопло при идеальном процессе истечения по формуле (1.2), коэффициент расхода по формуле (1.9).

При использовании формулы (1.2) можно принять, что $T_2 = T_2$. Площадь минимального сечения сопла F_* определяется через диаметр сопла, который замеряется инструментальным микроскопом в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

3.2. Учебно-исследовательская лабораторная работа

"Экспериментальное исследование потерь удельного импульса в малоразмерных соплах Лавала"

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Практическое ознакомление с методами экспериментального определения тяги малоразмерных сопел Лавала, исследование влияния конструктивных и режимных факторов на величину потерь удельного импульса.

Экспериментальная установка позволяет определять тягу малоразмерных сопел Лавала в диапазоне чисел Рейнольдса от $5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^5$.

В этом диапазоне чисел Рейнольдса рекомендуется проведение следующих исследований, связанных с определением потерь удельного импульса и выбросом оптимальной формы сверхзвуковой части сопла:

1. Исследование структуры потерь удельного импульса в малоразмерных соплах Лавала при различных числах Рейнольдса.
2. Исследование зависимости от числа Рейнольдса оптимального угла наклона к оси стенки конической сверхзвуковой части сопла.

3. Исследование целесообразности профилирования сверхзвуковой части сопла при низких числах Рейнольдса.
4. Исследование потерь удельного импульса в перспективных соплах с целью их оптимизации.

Лабораторная работа проводится в следующем порядке:

1. Изучается теория вопроса и экспериментальный газодинамический стенд для исследования характеристик малоразмерных сопел Лаваля.
2. Составляется программа проведения эксперимента в соответствии с методикой, изложенной в п.2 раздела 3.1 настоящего методического указания.
3. Исследуемое сопло устанавливается на двулучий рычаг 16 для измерения тяги (рис.2.1, рычаг приводится в горизонтальное положение, и вакуумная камера герметизируется).
4. Сопло выводится на рабочий режим в соответствии с программой исследования, который определяется величиной давления P_c и $P_{с.к.}$. Порядок вывода сопла на рабочий режим изложен в подпунктах а, б, и в пункта 3 раздела 3.1 настоящих методических указаний.
5. Подачей грузов через шкивные камеры II и 34 двулучий рычаг приводится в горизонтальное положение с помощью спиртового уровня 15.
6. Определяется величина груза $P_{эксп.}$, уравновешивающего тягу сопла, которая вместе с замеряемыми величинами P_2 , $P_{с.к.}$, T_2 , ΔP_2 , $P_{с.к.}$ и P_H записывается в протокол испытаний.
7. Определяется расход газа через сопло и коэффициент расхода сопла в соответствии с подпунктом "д" пункта 3 раздела 3.1 данных методических указаний.
8. Определяется экспериментальная величина тяги сопла в пустоте по формуле

$$P_{п.эксп.} = P_{эксп.} + \Delta P + P_{с.к.} \cdot F_a \quad (3.1)$$

В формуле (3.1) ΔP — поправка на упругость подводящего дюритового шланга 38, которая определяется экспериментально для заданных величин следующим образом.

На рабочую камеру 10 (рис.2.1) устанавливается заглушка, вакуумная камера герметизируется и в ней создается необходимое давление $P_{в.с.}$. После этого рычаг 17 приводится в горизонтальное положение с помощью равновесов, подаваемых через шлицовые камеры II и 34. Затем в рабочую камеру 10 подается давление P_0 , при этом из-за действия сил упругости в дюритовом шланге 38 рычаг 16 несколько отклоняется от горизонтального положения. Подчей равновесов через шлицовые камеры II,34 он возвращается в исходное горизонтальное положение, после чего определяется поправка ΔP как величина груза, приложенного к камере 10 для возвращения рычага 17 в это исходное положение.

Величина поправки ΔP не превышает десятых долей грамма.
 9. Определяется экспериментальная величина удельного импульса в пустоте

$$J_{у.л. \text{ эксп}} = \frac{P_{п \text{ макс}}}{m_{\text{эксп}}} \quad (3.2)$$

после чего по формулам (1.7) и (1.10) находится величина ϕ
 а по формуле (1.12) — величина $\phi_{крп}$.

3.3. Оформление результатов проведения учебно-исследовательских лабораторных работ

Результаты проведения учебно-исследовательских лабораторных работ оформляются в форме отчета в соответствии с ГОСТом [13], а также методическими указаниями [14].

Согласно этим документам, структура отчета должна быть следующей:

- введение,
- основная часть,
- заключение,
- список использованных источников,
- приложения.

Назначение введения - охарактеризовать современное состояние проблемы, которой посвящена работа, а также цели работы.

Основная часть отчета должна отражать методику, содержание и результаты выполненной работы.

Поэтому в ней необходимо дать описание экспериментальной установки, изложить методику проведения эксперимента, привести необходимые расчетные соотношения, используемые при обработке результатов эксперимента, а также показать полученные в результате проведения учебно-исследовательской лабораторной работы результаты в виде экспериментальных зависимостей с оценкой погрешности этих результатов.

Очень важно, чтобы в основную часть отчета включались и отрицательные результаты - они могут быть весьма полезными и поучительными, поскольку при проведении аналогичных исследований описание отрицательного результата и пути, который к нему привел, сможет предостеречь исследователя от повторения предшествующих ошибок, позволит ему не пойти по непродуктивному пути.

Заключение содержит выводы по результатам выполненной учебно-исследовательской работы, а также может содержать предложения по их использованию, включая внедрение. Очень важно, чтобы выводы, сделанные в процессе работы, не были бездоказательными, необоснованными.

В процессе работы могут выявиться новые (в известном смысле неожиданные) закономерности, новые данные. Все эти сведения также должны быть в заключении.

Список использованных источников должен содержать перечень источников, использованных при выполнении и оформлении учебно-исследовательской лабораторной работы. Источники следует располагать в порядке появления ссылок в тексте отчета. Сведения об источниках, включенных в список, необходимо давать в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-76.

Наиболее характерные случаи описания источников в соответствии с этим ГОСТом, приведены в списке использованных источников данных методических указаний.

В каждой выполненной исследовательской работе имеется вспомогательный материал, который представляет значительную ценность, однако при включении в основные разделы отчета этот материал загромождает текст, мешает развитию главной мысли, отвлекает читателя. Это могут быть таблицы и протоколы испытаний, методики проведения тарировки и испытаний отдельных приборов и систем измерения, вспомогательные иллюстрации и т.п. Такой материал следует выносить в приложения.

В заключение отметим, что отчет должен быть оформлен на одной стороне листа односортной белой бумаги формата 297x210 мм без рамки. Поля оставляются по всем четырем сторонам текста. Размер левого поля - не менее 35 мм, правого не менее 10 мм, размер верхнего и нижнего полей - не менее 20 мм.

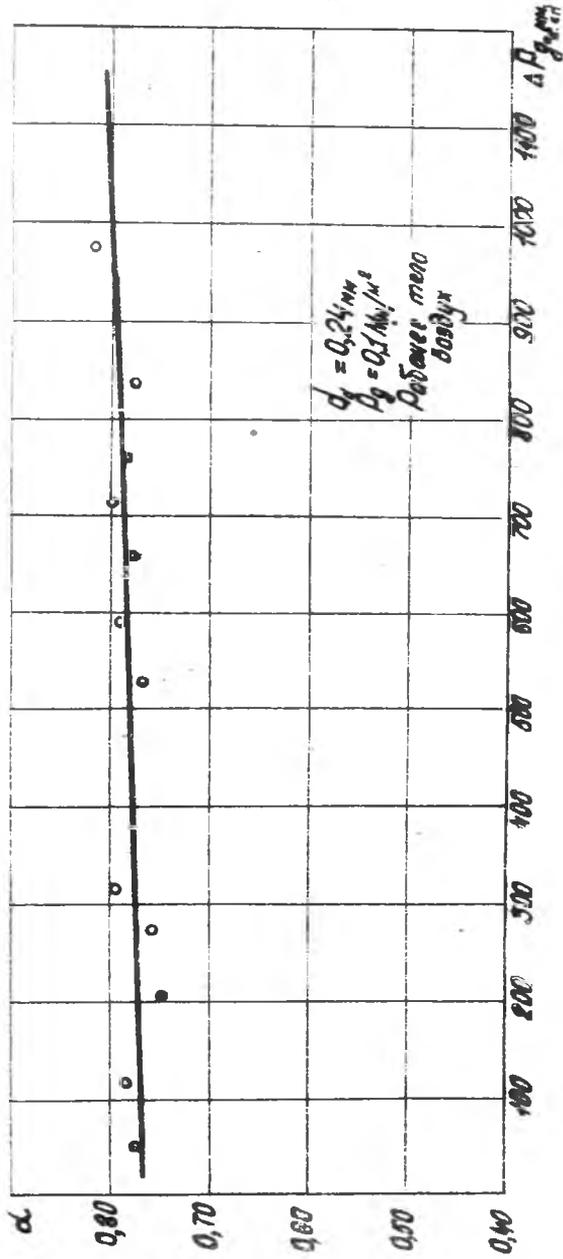


Рис 71. Коэффициент расхода диафрагмы $\sqrt{\alpha}$

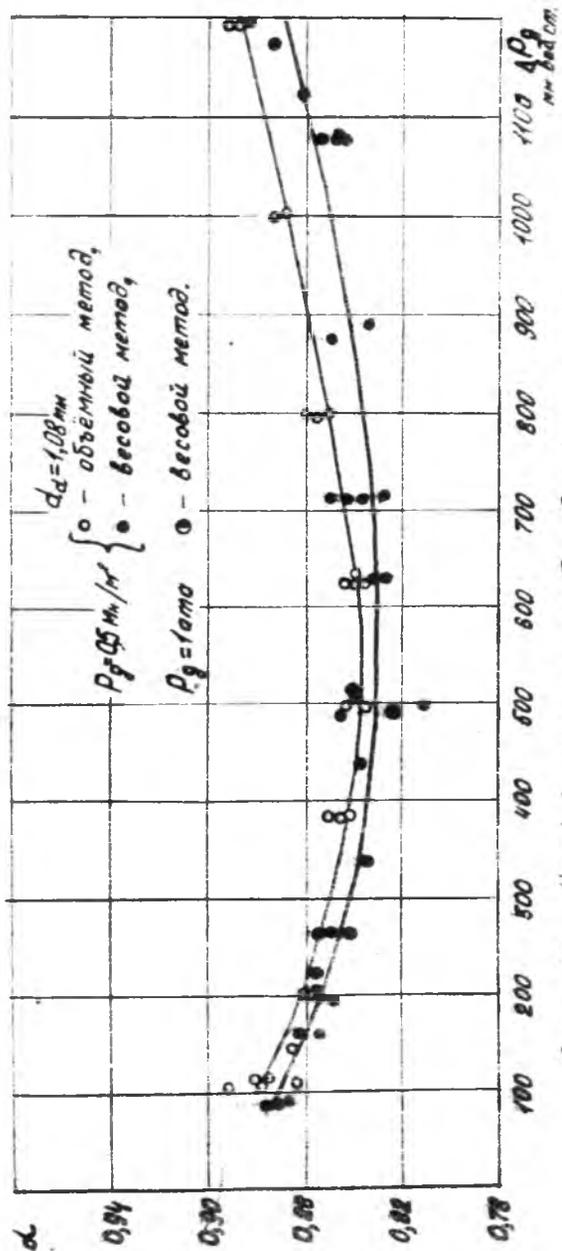


Рис. 13. Коэффициент распада диаграммы № 4

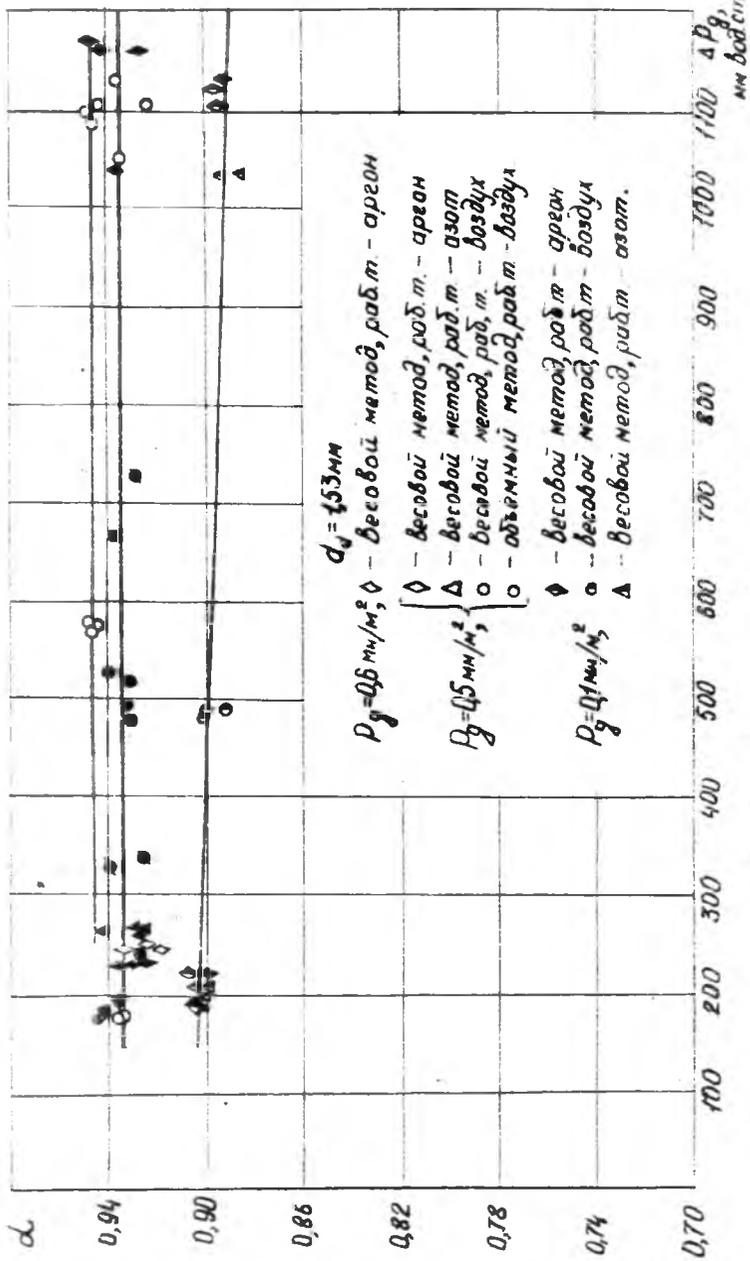


Рис. 14 Соотношение между диаметром и весом

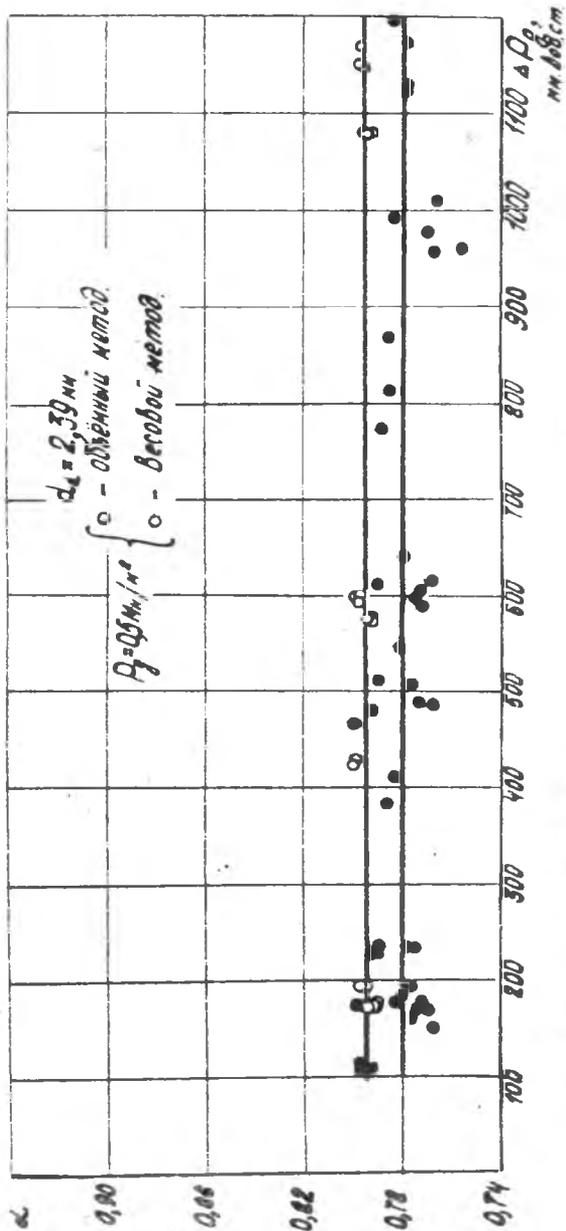


Рис. 15. Коэффициент расхода диафрагмы № 6

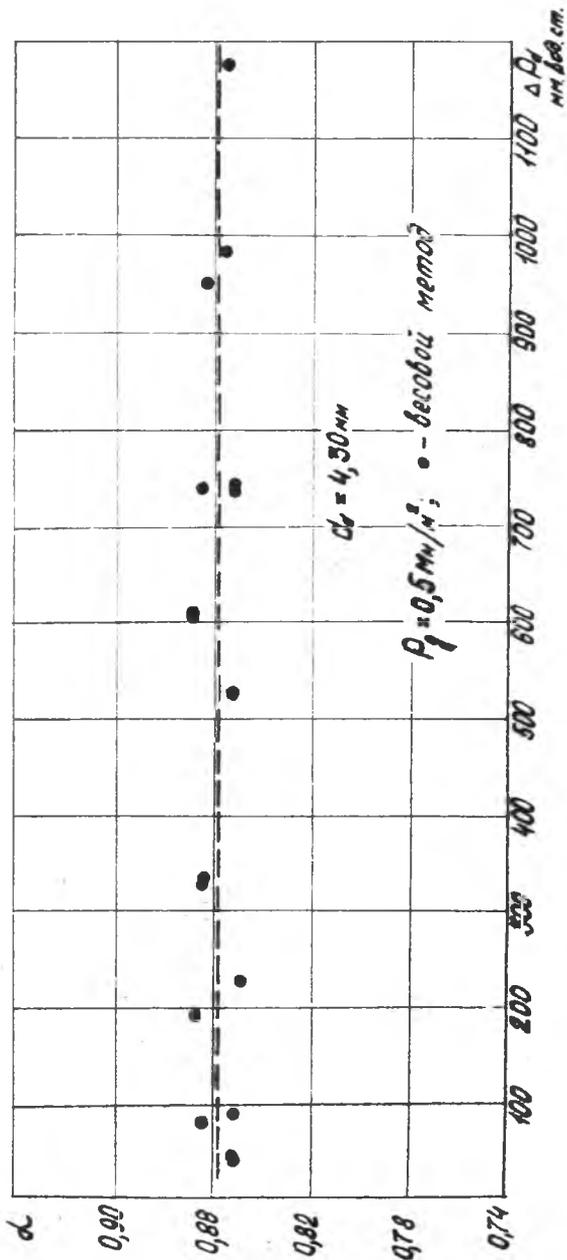


Рис. 16. Коэффициент расширения диафрагмы № 2

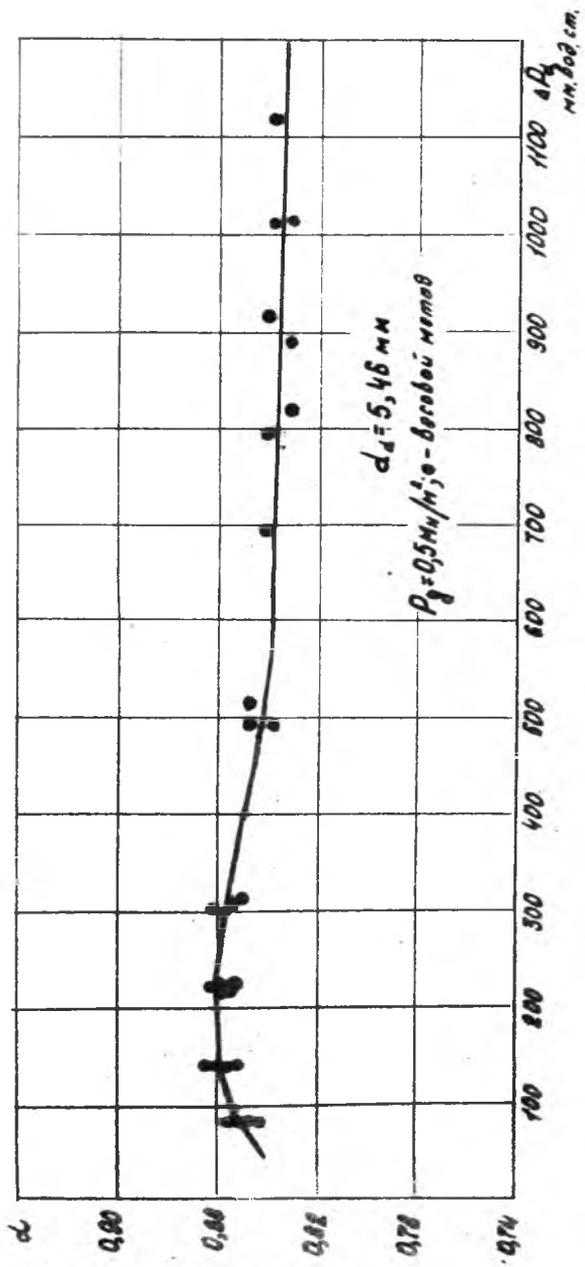


Рис. 17. Коэффициент расхода диафрагмы ЛР

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. АЛЕМАСОВ В.Е., ДРЕГАЛИН А.Ф., ТИШИН А.П. Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1980, 533 с.
2. *R. Beichel. Nozzle concepts for singlestage shuttles. Astronautics / Aeronautics, 6, 1975.*
3. ПИРУМОВ У.Г., РОСЛИКОВ Г.С. Течение газа в соплах. Изд. МГУ, М., 1978, 288 с.
4. УВАРОВ Н.М., БИЛИВ Е.И. Расчет и проектирование реактивных систем управления космических летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1974, 200 с.
5. ЛОСЕВ С.А. Газодинамические лазеры. Главная редакция физико-математической литературы издательства "Наука", М., 1977, 336 с.
6. МЕЗИРОВ И.И. Исследование течений в гиперзвуковых соплах аэродинамических труб. М., Труды ЦАГИ, вып. 2119, 1981, 1-60.
7. АБРАХАМ У. и др. Газодинамика очень малых сопел Лаваля. Технический перевод № 2200, ГОНТИ-8, 1982, 39 с.
8. НАТАЛЕВИЧ А.С. Воздушные микротурбины. М.: Машиностроение, 1979, 192 с.
9. ЕВСЕВЬЕВ Г.А. Экспериментальное исследование течения разреженного газа. Изв. АН СССР, "Механика", № 3, 1965, с.165-172.
10. *Кебеке S.V., Shustov S.A.
Yawed flow analyses supersonic nozzles according to boundary region approximation.
13 International symposium on rarefied gas dynamics, Book of abstracts, v. 2, 3. 461-463, Novosibirsk, 1982.*

11. Испытания жидкостных ракетных двигателей /ДУКОВСКИЙ А.Е.,
КОНДРУСЕВ В.С., ЛЕВИН В.Я., ОКОРОЧКОВ В.В./ М.Машиностроение,
1981, 199 с.
12. КЕБЕКЕ С.В., ШЕСТАКОВ В.Т. и др. Вакуумный газодинамический
стенд для исследования микросопел. Научно-техн.отчет, КуАИ,
1971 г.
13. ГОСТ 7-32-81. Отчет о научно-исследовательской работе
"Общие требования и правила оформления". М., 1981, 14 стр.
14. Методические указания для составления отчетов о научно-
исследовательских работах. М., 1975, 61 стр.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

1. Особенности газодинамики малоразмерных сопел Лаваля и экспериментального определения их характеристик	
1.1. Область применения малоразмерных сопел Лаваля.....	3
1.2. Основные расчетные зависимости для определения интегральных параметров сопел Лаваля при идеальном течении.....	3
1.3. Особенности газодинамики малоразмерных сопел Лаваля.....	5
1.4. Особенности экспериментального определения характе- ристик малоразмерных сопел Лаваля.....	11
2. Высотный газодинамический стенд для исследования характеристик малоразмерных сопел Лаваля.....	
2.1. Вакуумная система стенда.....	13
2.2. Система подачи рабочего тела и измерение его расхода.....	16
2.3. Система измерения тяги.....	22
2.4. Система замера давлений на входе в сопло и в вакуумной камере.....	23
2.5. Замер температуры на входе в сопло и перед расходомер- ной диафрагмой.....	25
3. Методика проведения учебно-исследовательских лабораторных работ.....	
3.1. Учебно-исследовательская лабораторная работа - "Экспериментальное исследование коэффициента расхода малоразмерных сопел Лаваля"	26
3.2. Учебно-исследовательская лабораторная работа "Экспериментальное исследование потерь удельного импульса в малоразмерных соплах Лаваля".....	29
3.3. Оформление результатов проведения учебно- исследовательских лабораторных работ.....	32
Приложение: "Экспериментальные зависимости коэффициента расхода расходомерных диафрагм от перепада давлений".....	34
Л и т е р а т у р а	42

Авторы-составители:

Станислав Владимирович КЕБЕКЕ

Станислав Алексеевич ШУСТОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СОПЕЛ ЛАВАЛЯ
НА ОСНОВЕ ИСПЫТАНИЯ ИХ МАЛОРАЗМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Подписано в печать 11.11.82 г.
Формат 60x84 ¹/16. Бумага оберточная белая.
Печать оперативная. Усл. печ.л. 2.5.
Уч.-изд.л. 2.0 . Тираж 100 экз.
Заказ № 306 . Бесплатно

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева
г.Куйбышев, ул.Молодогвардейская, 151.

Офсетный участок КуАИ, г.Куйбышев, ул.Ульяновская,18.