

УДК 53.089.6

Разработка экспериментальных средств для градуировки приемников давления

Афанасьев В.А.^{1*}, Монахова В.П.¹, Мухина С.Д.^{2}, Версин А.А.¹,
Назырова О.Р.^{1***}, Болховитин М.С.^{1****}**

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

²*Опытно-конструкторское бюро имени А. Люльки,
улица Касаткина, 13, Москва, 129301, Россия*

**e-mail: vaa96@mail.ru*

***e-mail: Svetlana.mukhina@okb.umpo.ru*

****e-mail: norton_07@mail.ru*

*****e-mail: brakoner@list.ru*

Аннотация

В работе представлены результаты разработки аэродинамической трубы для определения действительных аэродинамических характеристик приемников полного и статического давлений и направления воздушного потока. Приведены расчеты основных элементов аэродинамической трубы: дозвукового сопла, ресивера и диффузора. Разработана конструкция координатного устройства для закрепления приемников давлений и система автоматизированного управления, сбора и отработки получаемой информации при градуировке приемников давления.

Ключевые слова: градуировочный стенд, приемники давлений, сопло, ресивер, диффузор, координатное устройство.

В процессе экспериментальной отработки новых конструкций газотурбинных двигателей (ГТД) необходимо проводить измерение реальных скоростей газового

потока по тракту компрессора. В настоящее время для проведения таких измерений скорости газового потока в основном используются приемники полного давления, которые получили название «гребенки». На рис. 1 показана принципиальная схема гребенки, а на рис. 2 схематично показано возможное место установки таких измерителей скорости газового потока в конструкции компрессора ГТД.

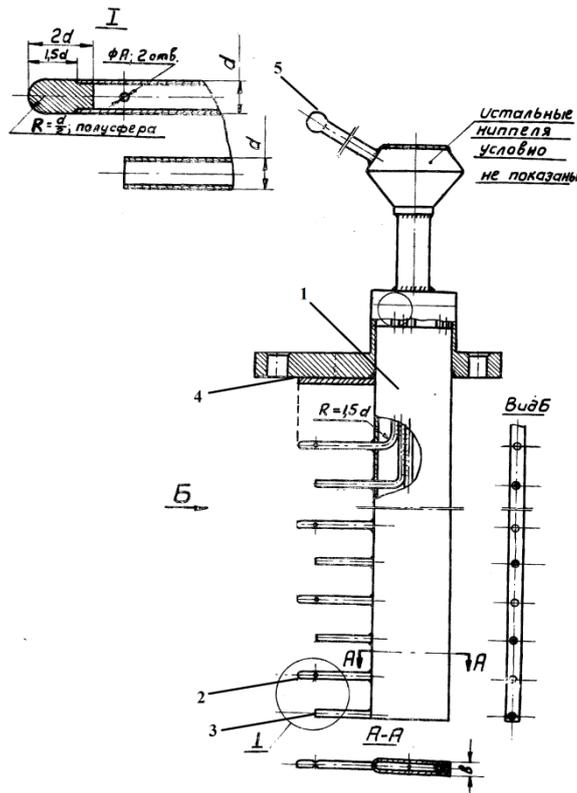


Рис. 1 Принципиальная схема конструкции гребенки.

1. корпус гребенки; 2. приемный элемент гребенки для измерения статического давления; 3. приемный элемент гребенки для измерения полного давления; 4. фланец для крепления гребенки к корпусу компрессора; 5. ниппель для соединения приемного элемента с датчиком давления.

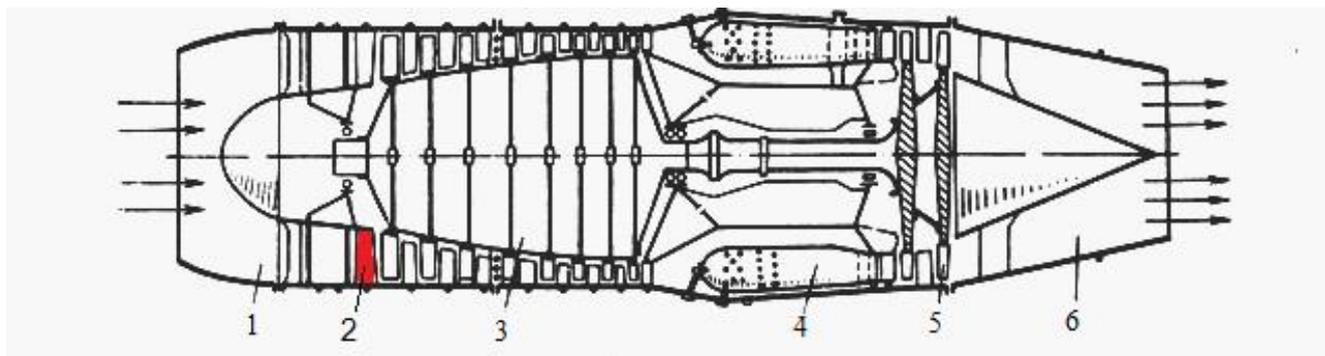


Рис. 2 Принципиальная схема ГТД и одно из возможных мест, где устанавливается гребенка: 1. входное устройство; 2. место установки гребенки, 3. компрессор; 4. камера сгорания; 5. турбина; 6. сопло.

Наряду с указанным методом измерения скорости газового потока при экспериментальной отработке компрессора ГТД можно использовать и другие методы [1], а также лазерно-доплеровские измерители скорости, но такие методы исследования течения в компрессорах достаточно сложны и в настоящее время практически к ним утрачен интерес.

Проблема использования гребенок в качестве измерительного инструмента для определения скорости газового потока связана с необходимостью изготовления конструкции гребенки для каждого места установки индивидуально. Поэтому, для метрологического обеспечения измерений скорости газового потока гребенками предъявляются следующие требования к средствам их градуировки:

- определение относительной скорости газового потока λ в месте размещения приемного отверстия гребенки должно определяться с погрешностью $\pm 0,01$;
- измерения числовых значений давлений в пневмолиниях исследуемой гребенки определяются с погрешностью не более $\pm 0,3 \%$ от измеряемого значения;

– определение параметров линейного и углового позиционирования приемного отверстия исследуемой гребенки определяются с погрешностью ± 1 мм и $\pm 0,5^\circ$ соответственно.

Целью настоящей работы явилась разработка конструкции аэродинамической трубы (АТ) для градуировки приемников давления, создающей контролируемый воздушный поток с равномерной по значению скоростью на срезе дозвукового сопла.

Основными задачами, которые решались при разработке элементов АТ были:

– получение контролируемого потока газа на срезе сопла с относительной скоростью λ от 0,30 до 1,00;

– разработка координатного устройства, с закреплённым на нем приемнике давлений, которое должно плавно перемещать приемное отверстие исследуемого приемника на геометрической оси сопла и изменять угол между вектором скорости потока и осью приемного отверстия в диапазоне от минус 45° до $+ 45^\circ$ в тангенциальной и меридиальной плоскостях.

Учитывая необходимость обеспечения большого диапазона скорости газа на срезе сопла от 0,30 до 1,00, в качестве источника сжатого воздуха была выбрана компрессорная станция на базе двух компрессоров ОК-500 с расходом воздуха до 6 кг/с, давлением до 4 кгс/см² и температурой воздуха при работе без холодильника до 80 °С. На рис. 3 представлена схема рабочего участка АТ, разработанного для решения поставленных задач.

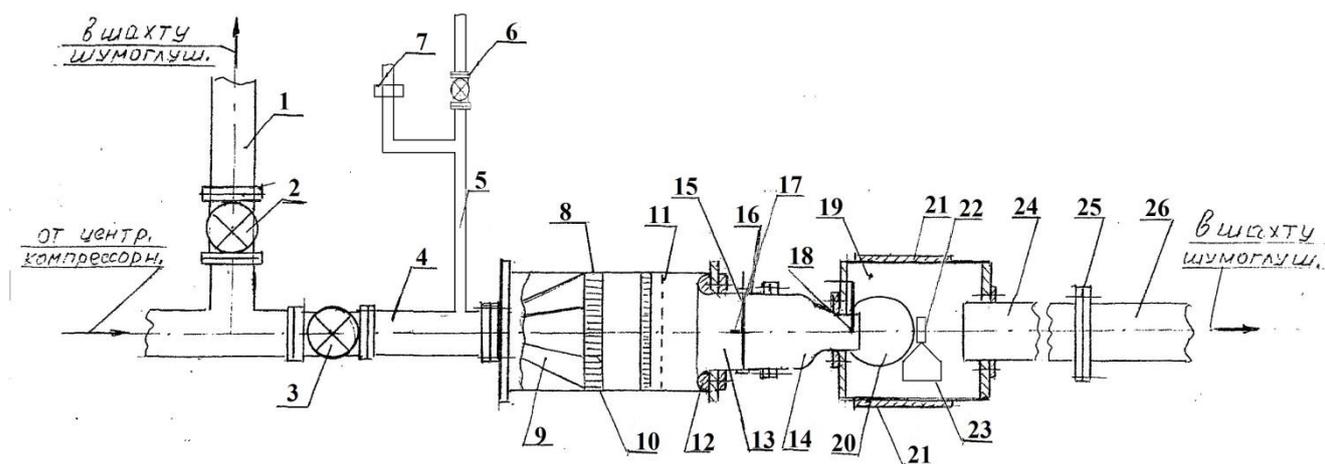


Рис. 3 Схема рабочего участка АТ

1. Трубопровод перепуска; 2. Заслонка перепуска; 3. Входная заслонка установки; 4. Входной патрубок установки; 5. Байпасный перепуск; 6. Заслонка байпасного перепуска; 7. Предохранительная мембрана; 8. Ресивер; 9. Выравнивающая сетка; 10. Направляющие конуса; 11. Хонейкомб; 12. Входная лемниската, 13. Входной патрубок сопла; 14. Дозвуковое сопло; 15. Приемник измерения статического давления; 16. Термопара; 17. Приемник измерения полного давления; 18. Приемники статического давления на срезе сопла; 19. Рабочая камера; 20. Боковые стенки рабочей камеры с иллюминаторами; 21. Съёмные стенки рабочей камеры; 22. Гребенка; 23. Каретка для координатного устройства; 24. Диффузор; 25. Перекрывной шибер; 26. Патрубок шахты шумоглушения

Подводящий трубопровод обеспечивает подвод воздуха от компрессора к АТ и перекрывается входной заслонкой (3), имеющий перепуск (1) с заслонкой (2), а для тонкой регулировки расхода и давления газа на входе в ресивер (8) имеется байпасный перепуск (5) с заслонкой (6), который необходим для установления заданной скорости газового потока на срезе сопла с требуемой точностью. При

возникновении нештатных ситуаций срабатывает предохранительный клапан (7). Ресивер (8) служит для успокоения (выравнивания) потока по направлению и скорости. Скорость воздуха в ресивере не должна превышать несколько метров в секунду. Максимальный расход воздуха через ресивер равен максимальному расходу через сопло при $\lambda_c=1,00$.

Конструктивно внутри ресивера расположены: направляющие конуса (9), хонейкомб (10), выравнивающая сетка с опорной решеткой (11) и лемнискатой (12) на входе в входной патрубок сопла (13). Направляющие конуса ресивера (9) позволяют снизить потери полного давления на входе в ресивер. Хонейкомб (10) выравнивает поток по направлению, а выравнивающая сетка (11) выравнивает поток по скорости. Входная лемниската (12) служит для уменьшения потерь. По окружности входного патрубка сопла (13) расположены приемники статического давления (15) и термомпара (16) для фиксации соответствующих параметров. В центре входного патрубка установлен приемник полного давления (17). Дозвуковое сужающееся сопло (14), рассчитанное по формуле Витошинского, обеспечивает равномерное поле скоростей и давлений газового потока на срезе сопла с минимальными потерями. На срезе сопла имеются три закольцованных точек измерения статического давления (18). Рабочая камера (19), выполненная в виде камеры «Эйфеля», служит для размещения координатного устройства (23) и объекта градуировки - гребенки (22). Координатное устройство предназначено для установки гребенки (22) в заданном сечении струи газового потока и управлении положением этой гребенки по заданной программе градуировки. На выходе из

рабочей камеры АТ установлен диффузор (24) для повышения давления и уменьшения скорости газового потока. Перекрывной шибер (25) предназначен для препятствия обратному потоку воздуха в нестандартных случаях работы стенда. Выхлоп установки в шахту шумоглушения происходит через патрубок шахты (26). Выходы всех перепусков так же выведены в шахту шумоглушения.

Для получения струи газового потока с заданными характеристиками в работе были проведены газодинамические расчеты следующих элементов АТ:

- определение основных геометрических размеров дозвукового сопла;
- расчет элементов ресивера;
- расчет геометрических размеров диффузора.

Определение основных размеров сопла АТ связано с режимом истечения газового потока из сужающего сопла в рабочую камеру АТ. Режим истечения определяется газодинамической функцией $\pi(\lambda)$ от приведенной скорости потока λ следующим соотношением

$$\pi(\lambda_c) = \frac{P_k}{P_c^*}, \quad (1)$$

где, P_k - давление в рабочей камере, P_c^* - полное давление потока на срезе сопла. Считается, что течение энергоизолированное и изоэнтропное и параметры торможения сохраняют постоянные значения, т.е.

$$T_c^* = T_k^* \text{ и } P_c^* = P_k^*. \quad (2)$$

Критическое отношение давлений обеспечивает истечение со скоростью звука т.е.

$$V_{c \text{ кр}} = a_{\text{кр}} \cdot \lambda_c, \quad (3)$$

и в этом случае

$$G = G_{кр} = G_{max}, \quad (4)$$

где $V_{с кр}$ – критическая скорость потока на срезе сопла; $a_{кр}$ – скорость звука в критическом сечении; G – расход воздуха через АТ.

Для воздуха $\lambda(\lambda_{кр}) = 0,528$ при $\kappa = 1,4$; $\lambda_{кр} = 1$. Давление в рабочей камере АТ должно превышать атмосферное в диапазоне от 0,15 до 0,20 кгс/см², чтобы преодолеть сопротивление выхлопной системы и шахты шумоглушения, следовательно

$$\frac{P_{к}}{P_{с кр}^*} = 0,528, \text{ а } P_{с кр}^* = \frac{1,2}{0,528} = 2,273 \text{ кгс/см}^2. \quad (5)$$

Максимальный расход воздуха, при выбранном источнике сжатого воздуха составит $G_{max} = 5$ кг/с, давление торможения $P_{с кр}^* = 2,27$ кгс/см². Зададимся температурой воздуха подаваемой компрессорной станцией равной $T^* = 293$ К. Из уравнения расхода

$$G = \frac{m \cdot P_{с кр}^* \cdot F_{с кр} \cdot q(\lambda_{кр})}{\sqrt{T^*}}, \quad (6)$$

где, $m = 0,3965$ для $\kappa = 1,4$ (рабочее тело воздух) и $\lambda = 1$, $q(\lambda_{кр}) = 1$, определим площадь среза сопла

$$F_{с кр} = \frac{5 \cdot 17.4}{0.3965 \cdot 2.27} = 96.66 \text{ см}^2, \quad (7)$$

что соответствует диаметру среза осесимметричного сопла равному $d_{с кр} = 11,09$ см. Примем диаметр среза сопла $d_{с кр} = 110$ мм.

На характер зависимости $G_{отл}(\lambda)$ оказывает влияние распределения скоростей в выходном сечении сопла. Плавно суживающаяся форма сопла приближает

распределение скоростей в выходном сечении к равномерному. С этой целью стенки сопла должны быть особым образом рассчитаны. Профиль суживающегося сопла рассчитываем по формуле Витошинского [2] с использованием результатов исследований геометрических параметров сопла с контуром Витошинского представленных в работе [3].

$$R = \frac{R_{cp}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{R_{cp}}{R_{вх}}\right)^2\right] \cdot \frac{\left(1 - \frac{3x^2}{l^2}\right)^2}{\left(1 + \frac{x^2}{l^2}\right)^3}}} \quad (8)$$

R – текущий радиус сопла (мм); R_{cp} – радиус среза сопла (мм);

$R_{вх}$ – радиус входа сопла (мм); L – длина сопла (мм);

$l = L\sqrt{3}$ (мм); X – текущая координата (мм).

Величины, входящие в формулу (8) пояснены на рис. 4.

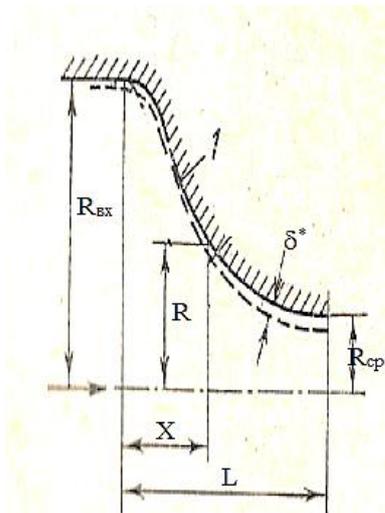


Рис. 4 Построение профиля Витошинского.

Сопла такого профиля применяются для аэродинамических труб дозвуковых скоростей. Опыт показывает, что в широком диапазоне скоростей до $\lambda = 0,9 - 0,95$ поле скоростей за соплом достаточно равномерно. Отметим, что при построении

профилей полная длина сопла L задается ($L > R_{\text{вх}}$) и колеблется в широких пределах (для фиксированных значений $R_{\text{вх}}$ и $R_{\text{ср}}$). При истечении из суживающихся сопел плавный профиль стенок обеспечивает постепенное расширение потока и определяет форму линий тока. Возникающие на входе поперечные градиенты давления и радиальные составляющие скоростей уменьшаются и в выходном сечении близки к 0. Поток в выходном сечении имеет практически равномерное поле скоростей. Описанная схема истечений из сопла корректируется экспериментом, показывающим влияние пограничного слоя. Установлено [2], что под воздействием трения несколько меняется распределение давлений по стенкам сопла, так как в слое происходит частичное вытеснение газа и профиль сопла должен быть «деформирован» на толщину вытеснения δ^* , меняющуюся вдоль сопла. Такая корректировка осуществляется расчетом пограничного слоя [2] и в большинстве случаев, пограничный слой в суживающихся соплах можно считать ламинарным и δ^* достаточно мала.

Для дальнейших расчетов примем: диаметр сопла на входе $D_{\text{вх}} = 200$ мм, диаметр среза сопла на выходе $d_c = 110$ мм, и учитывая результаты исследований в работе [3] длину сопла задаем $L = 260$ мм.

Подставив числовые значения в формуле (8) и проведя вычисления, получим зависимость текущего радиуса сопла от текущей координаты по длине сопла, которая приведена в таблице 1.

Зависимость текущего радиуса сопла от текущей координаты по длине сопла
(выражено в мм).

Таблица 1

X	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
R	100	98,02	86,22	79,43	73,39	68,29	64,22	61,05	58,67	57,78	56,21	55,21	55,27	55,00

Полученный реальный профиль Витошинского сужающегося сопла по заданным параметрам представлен на рис.5.

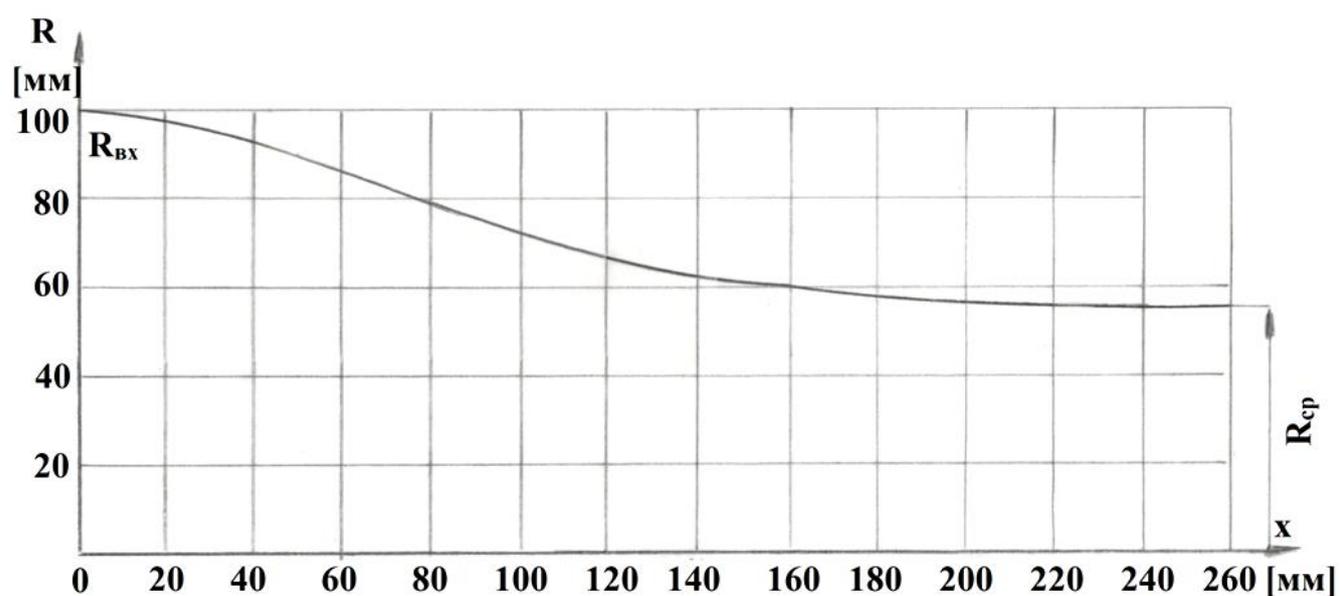


Рис.5 - Профиль сужающегося сопла

Проведенный математический расчет профиля скорости по радиусу газовой струи на срезе сопла подтвердил правильность полученного реального профиля суживающегося сопла, что показано на рис. 6.

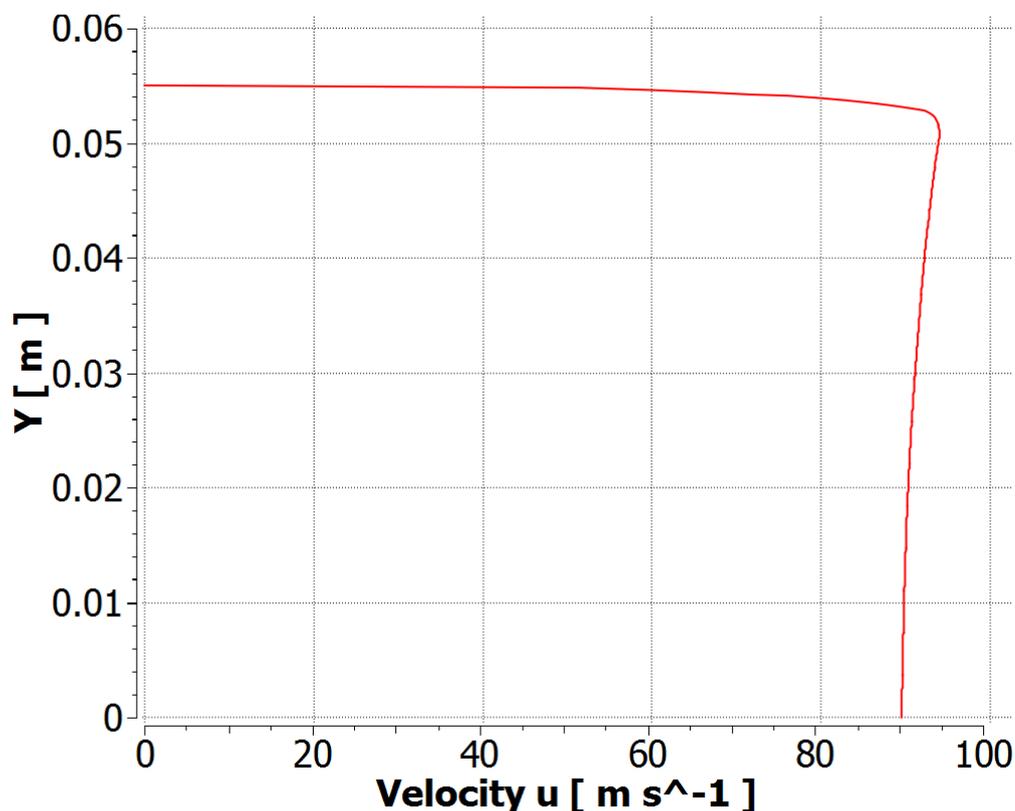


Рис 6. Профиль скорости газового потока по радиусу струи.

Расчет ресивера начинается с выбора размеров его корпуса. Была выбрана стандартная труба с внешним диаметром равным 600 мм, что обеспечивает условие $\lambda < 0,003$, тогда при толщине стенки корпуса равной 9 мм, диаметр проточной части ресивера будет равен $D_p = 582$ мм и соответственно площадь составит $F_p = 2660,33$ см².

Проведем расчет для случая $\lambda_c = 1$.

Из уравнения неразрывности имеем:

$$F_c \cdot q(\lambda_c) = F_p \cdot q(\lambda_p), \quad (9)$$

тогда при $q(\lambda_c) = 1$ получим:

$$q(\lambda_p) = F_c / F_p = 95,03 / 2660,33 = 0,0357, \quad (10)$$

что соответствует $\lambda_p = 0,023$, где:

F_c – площадь на срезе сопла см²;

F_p – площадь сечения ресивера см².

Критическая скорость звука для воздуха равна $a_{кр} = 313,25$ м/с при $T_p^* = 293$ К, тогда скорость потока в ресивере будет

$$V_p = a_{кр} \cdot \lambda_p = 313,25 \times 0,023 = 7,2 \text{ м/с}, \quad (11)$$

что соответствует требованиям, предъявляемым к конструкции ресивера. Так как скорость потока в ресивере мала, можем считать, что потери полного давления в ресивере малы, т.е. $\sigma \approx 1$.

Аналогичным образом вычислим скорости потока в ресивере, а также в подводящем трубопроводе с геометрическими размерами трубопровода $D_{тр} = 315$ мм, $F_{тр} = 779,31$ см² при $\lambda_c = 0,3$; $\lambda_c = 0,474$.

Результаты расчета скорости потока в ресивере и подводящем трубопроводе при $\lambda_c = 0,3$; $\lambda_c = 0,474$, $\lambda_c = 1$ сведены в таблицу 2.

Скорости потока в ресивере и в трубопроводе при $\lambda_c = 0,3$; $\lambda_c = 0,474$, $\lambda_c = 1$

Таблица 2

λ_c	P_c^* кг/см ²	T_c^* *К	$q(\lambda_c)$	$q(\lambda_p)$	λ_p	$a_{кр}$ м/с	V_p м/с	$q(\lambda_{тр})$	$\lambda_{тр}$	$V_{тр}$ м/с
1	2,27	293	1	0,0357	0,023	313,2	7,2	0,1229	0,078	24,43
0,474	1,4	293	0,7179	0,0256	0,016	313,2	5,01	0,0875	0,555	17,38
0,3	1,27	293	0,4917	0,0176	0,012	313,2	3,7	0,059 9	0,038	11,9

Расчет направляющих конусов ресивера связан с обеспечением плавного перехода от подводящего трубопровода диаметром $D_{тр} = 315$ мм на диаметр ресивера $D_p = 582$ мм. Переходной конусный участок, состоящий из нескольких коаксиально расположенных конусов, рассчитывается с целью уменьшения потерь полного давления от вихрей, образующихся при внезапном расширении потока.

Проектирование направляющих конусов осуществляется таким образом, чтобы площади входа в каналы, образованные конусными поверхностями были равны между собой, так же как площади выхода из конусных каналов как показано на рис.7, и относились между собой, как суммарная площадь входа в ресивер (равная площади выхода из подводящего трубопровода) к суммарной площади поперечного сечения ресивера. Пренебрегая толщиной материала, из которого выполнены направляющие конуса, и поперечными сечениями пилонов конусов (толщина материала от 1,5 до 2,0 мм) и проводя расчет по средним диаметрам, получим:

$$F_1/f_1=F_2/f_2=F_3/f_3=F/f; \quad (12)$$

$$F_1=F_2=F_3=F/3=2646,6/3=882,2 \text{ см}^2; \quad (13)$$

$$f_1=f_2=f_3=f/3=771,9/3=257,3 \text{ см}^2; \quad (14)$$

$$D_1=335,1 \text{ мм}; D_2=474 \text{ мм}; D_3=580,6 \text{ мм}.$$

Продолжая вычисления, получим диаметры входных конусов

$$d_1=181 \text{ мм}, d_2=256 \text{ мм}, d_3=313,5 \text{ мм}, \text{ где:}$$

f - площадь направляющих конусов на входе;

F - площадь направляющих конусов на выходе;

d - диаметр направляющих конусов на входе;

D - диаметр направляющих конусов на выходе.

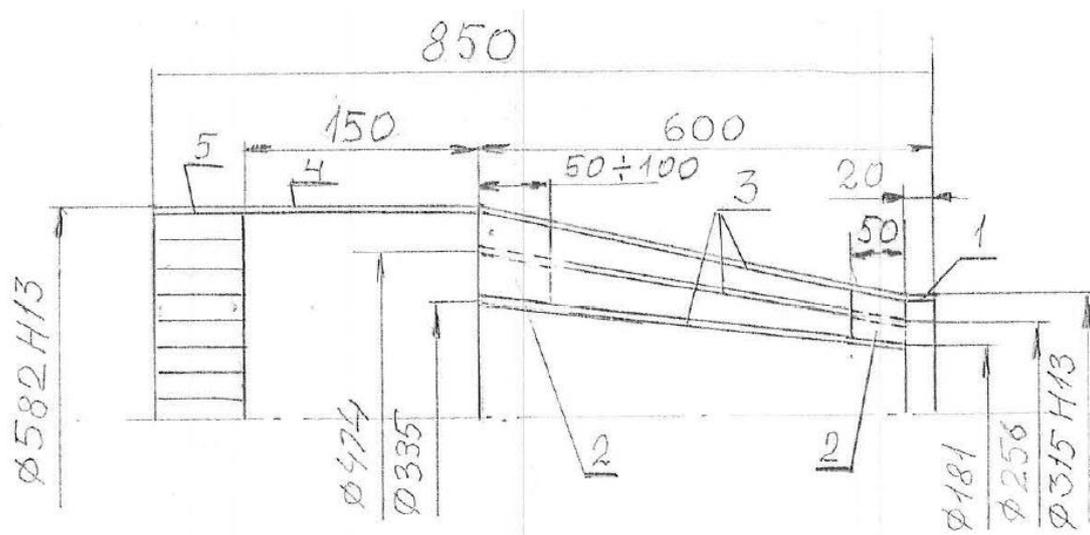


Рис. 7 - Схема направляющих конусов и спрямляющей решетки

1. центрирующая обечайка; 2. пилоны; 3. направляющие конуса; 4. обечайка;
5. спрямляющая решетка

Длину центрирующей обечайки примем равной 20 мм. Длину направляющих конусов примем равной 600 мм.

Чтобы погасить возмущения и вихри потока воздуха, на выходе из направляющих конусов перед входом в сопло в ресивере, устанавливается спрямляющая решетка (хонейкомб) и выравнивающая сетка, гасящая турбулентные возмущения. Спрямляющая решетка представляет собой конструкцию, состоящую из ячеек длиной от 2 до 10 калибров при толщине стенок от 0,5 до 2,0 мм. Отношение поперечных размеров ячейки к сечению ресивера обычно принимают от 1/50 до 1/150. Примем решетку, изготовленную из материала толщиной 1,0 мм с ячейкой 40 на 40 мм, отношением к площади ресивера 1/162 и длиной 100 мм, т.е. 2,5 калибра.

Спрямляющая решетка выравнивает поток по направлению, разбивает крупные вихри, и уменьшает неравномерность продольных скоростей потока. В то

же время решетка вносит некоторые возмущения в поток в виде аэродинамического следа. Поэтому за решеткой следует сетка для гашения возмущений и уменьшения неравномерностей в распределении скоростей. Выравнивающее действие сетки на поток основано на принципе большего торможения больших скоростей, так как потери скорости пропорциональны их квадрату.

Теоретические исследования [4], достаточно хорошо согласующиеся с экспериментом, показали, что ΔW_2 - неравномерность за сеткой и ΔW_1 - неравномерность перед сеткой связаны между собой зависимостью:

$$\Delta W_2 = (2 - \xi / 2 + \xi) \cdot \Delta W_1, \quad (15)$$

где ξ – коэффициент сопротивления сетки.

При $\xi = 2$ $\Delta W_2 = 0$, то есть неравномерность скоростей потока равна нулю. Сетка, действуя как гидравлическое распределенное сопротивление, устраняет неравномерность распределения скоростей поперек потока. Для этого сетка должна быть изготовлена из проволоки малого диаметра и иметь весьма малые ячейки. На рис. 8 [4] показано влияние сеток, имеющих различное сопротивление, на выравнивание потока. Сетку следует подбирать с минимальным размером ячейки порядка от 2 до 5 мм с коэффициентом сопротивления порядка от 1,8 до 2,2 и устанавливать ее на возможно большем расстоянии от входа в сопло.

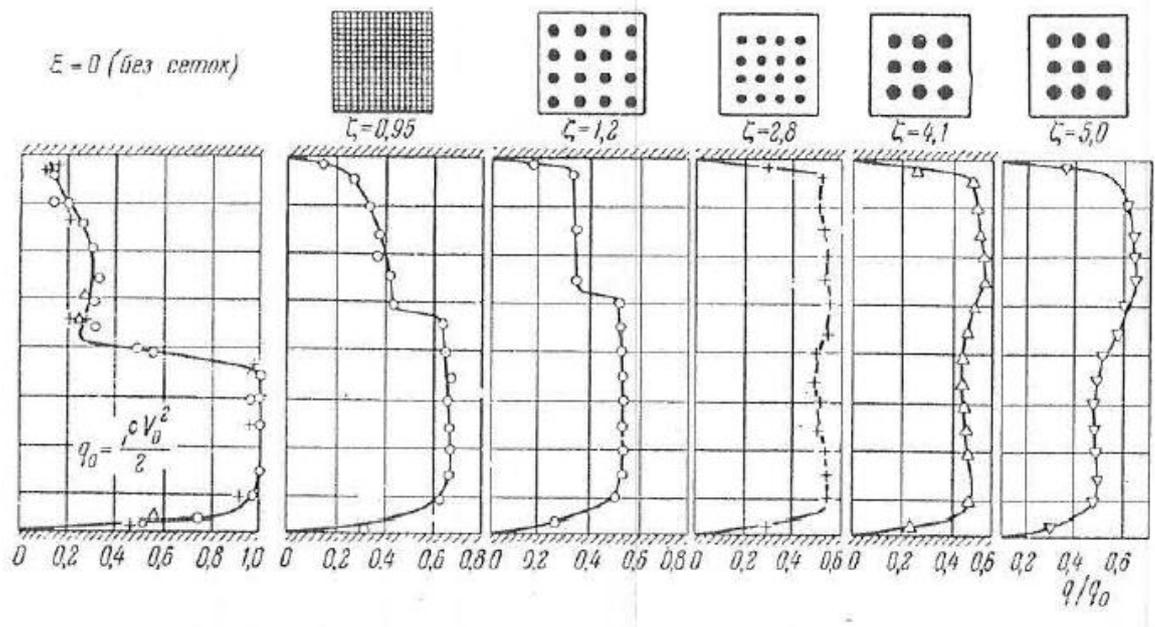


Рис.8 - Выравнивающее действие сеток с различным сопротивлением

Для подбора сетки воспользуемся зависимостью из работы [4]:

$$\xi = (1-\gamma) + (1-\gamma)^2 / \gamma^2, \quad (16)$$

где: $\gamma = F_2 / F_1$ - отношение площади сетки в свету к общей площади сетки.

Предварительно определяем число Re воздушного потока в ресивере для внесения поправки в коэффициент сопротивления сетки. Число Re для скоростей в ресивере равных от 3,6 до 7,2 м/с и толщины проволоки сетки от 1,0 до 1,5 мм очень мало и изменяется в диапазоне от 24 до 72, т.е. среднее число $Re \approx 48$.

$$\xi_{Re} = \xi_1 \times \xi, \quad (17)$$

где $\xi_1 = 1,4$ - поправка на число Re взята из работы [4] рис.9.

Таким образом:

При $\xi = 2$ получим

$$\xi_{Re} = 1,4 \times 2 = 2,8 \quad (18)$$

и уравнение (16) можно записать в виде:

$$2,8=(1-\gamma)+(1-\gamma)^2/\gamma^2 \quad (19)$$

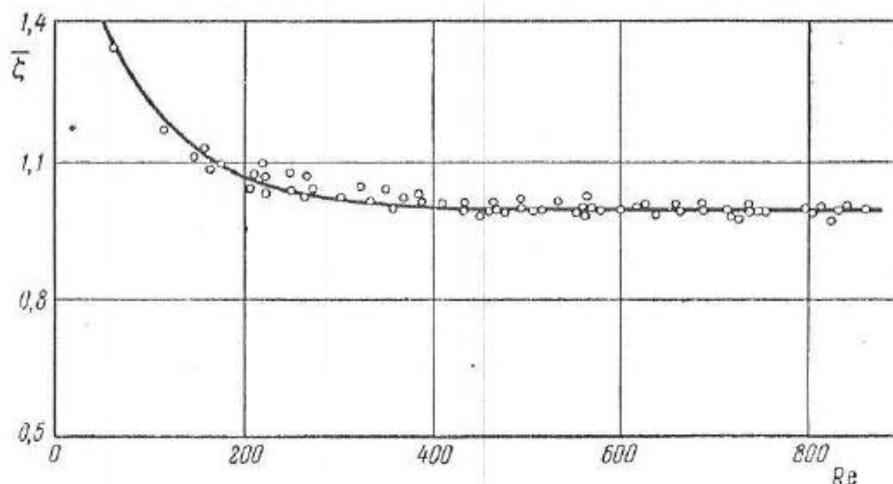


Рис. 9 - Влияние числа Re на сопротивление сеток

Произведя преобразование уравнения получим:

$$\gamma + 0,8\gamma^2 + 2\gamma - 1 = 0 \quad (20)$$

Решив это уравнение, получим:

$$\gamma = F_2/F_1 \approx 0,4. \quad (21)$$

На рис. 10 представлен фрагмент выравнивающей сетки с соответствующими обозначениями.

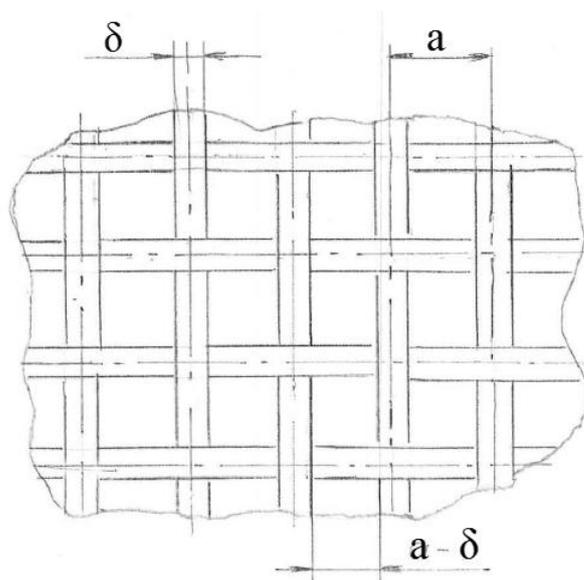


Рисунок 10 - Выравнивающая сетка

(δ . диаметр проволоки равный 1 мм; а. шаг сетки равный 2,72 мм; а- δ . ячейка сетки в свету равная 1,72 мм)

Общая площадь ячейки сетки равна a^2 , как показано на рис. 10, а площадь ячейки сетки в свету $(a-\delta)^2$, тогда:

$$\gamma = F_2/F_1 = (a-\delta)^2/a^2 \approx 0,4 \quad (22)$$

или

$$0,4a^2 = a^2 - 2a\delta + \delta^2, \quad (23)$$

примем δ - толщину проволоки равной 1 мм, тогда:

$$0,6a^2 - 2a + 1 = 0. \quad (24)$$

Решив это уравнение, получим: $a \approx 2,72$.

Подберем сетку наиболее близкую по сортаменту, изготовленную из нержавеющей проволоки диаметром 1 мм с квадратными ячейками размером близкими 1,72 на 1,72 мм в свету.

Расчет диффузора.

Диффузор – элемент АТ предназначенный для преобразования кинетической энергии потока в статическое давление, т.е. для восстановления давления.

Расчет диффузора проводим для режима с максимальным расходом воздуха $G_c = 5$ кг/с.

Принимаем коэффициент сохранения полного давления $\sigma_{p.ч.}$ на участке струи от среза сопла до входа в диффузор – $L_{p.ч.}$ равным $\sigma_{p.ч.} = 0,8$ [5]

Полное давление на срезе сопла при $\lambda_c = 1$ вычислено ранее и равно $P_c^* = 2,27 \text{ кгс/см}^2$.

Используя уравнение неразрывности $G_c = G_{\text{вх. диф}}$ получим

$$F_{\text{вх. диф.}} \cdot P_{\text{вх. диф.}}^* = F_c \cdot P_c^* \quad (25)$$

Или

$$F_{\text{вх. диф.}} = \frac{P_c^* \cdot F_c}{P_{\text{вх. диф.}}^*} = \frac{P_c^* \cdot F_c}{P_c^* \cdot \sigma_{\text{р. ч.}}} = \frac{F_c}{\sigma_{\text{р. ч.}}} = \frac{95,03}{0,8} = 118,8 \text{ см}^2, \quad (26)$$

тогда диаметр входа в диффузор будет

$$D_{\text{вх. диф.}} = \sqrt{\frac{F_{\text{вх. диф.}} \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{118,8 \cdot 4}{\pi}} = 12,3 \text{ см.} \quad (27)$$

Принимаем диаметр входа в диффузор равным $D_{\text{вх. диф.}} = 125 \text{ мм}$, тогда

$$F_{\text{вх. диф.}} = \frac{\pi(12,5)^2}{4} = 122,7 \text{ см}^2 \quad (28)$$

Используя уравнение расхода, вычислим параметры на входе в диффузор.

$$G_{\text{диф.}} = \frac{m \cdot F_{\text{вх. диф.}} \cdot P_{\text{вх. диф.}}^* \cdot q(\lambda_{\text{вх. диф.}})}{\sqrt{T^*}} \quad (29)$$

$$q(\lambda_{\text{вх. диф.}}) = \frac{G_{\text{диф.}} \cdot \sqrt{T^*}}{m \cdot F_{\text{вх. диф.}} \cdot P_{\text{вх. диф.}}^*} = \frac{5 \cdot \sqrt{293}}{0,3965 \cdot 122,7 \cdot 1,816} = 0,9687 \quad (30)$$

отсюда

$$\pi(\lambda_{\text{вх. диф.}}) = \frac{P_{\text{вх. диф.}}}{P_{\text{вх. диф.}}^*} = 0,6519 \quad (31)$$

$$P_{\text{вх. диф.}} = 1,816 \cdot 0,6519 = 1,1838 \text{ кгс/см}^2 \quad (32)$$

Вычислим давление на срезе выходной конической части диффузора, пренебрегая потерями полного давления в цилиндрической и конической частях диффузора рис. 11.

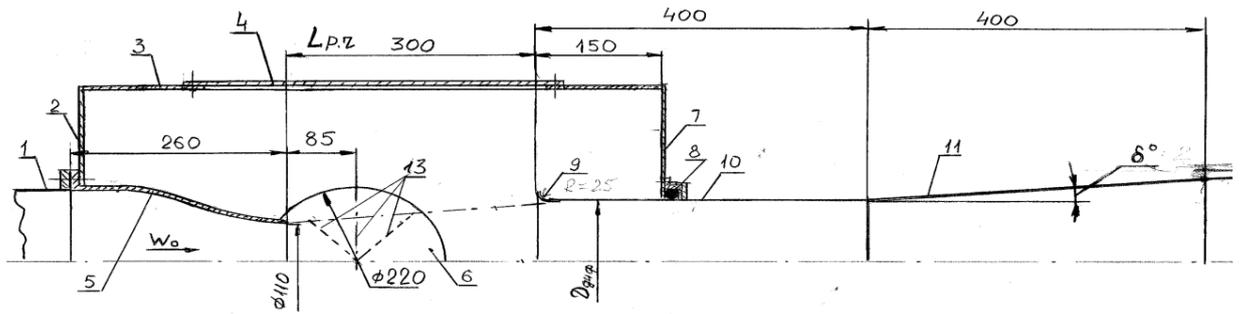


Рис. 11 Принципиальная схема участка АТ с рабочей камерой «Эйфеля»

1. переходник; 2. передняя стенка рабочей камеры; 3. верхняя стенка; 4. крышка; 5. сопло; 6. боковая стенка; 7. задняя стенка рабочей камеры; 8. уплотняющий зажим; 9. козырек диффузора – съемный с R равным 25 мм; 10. цилиндрическая часть диффузора; 11. коническая часть диффузора;

Диаметр цилиндрической части диффузора примем равным диаметру входа. Угол раскрытия диффузора обозначим через δ° на сторону, тогда при длине конической части равной 400 мм – диаметр среза диффузора составит:

$$D_{\text{ср. диф.}} = 2\Delta + D_{\text{вх. диф.}}, \quad (33)$$

где $\Delta = \text{tg}\delta \cdot 400$,

т.к.

$$q(\lambda_{\text{ср. диф.}}) = \frac{F_{\text{вх. диф.}} \cdot q(\lambda_{\text{вх. диф.}})}{F_{\text{ср. диф.}}}, \quad (34)$$

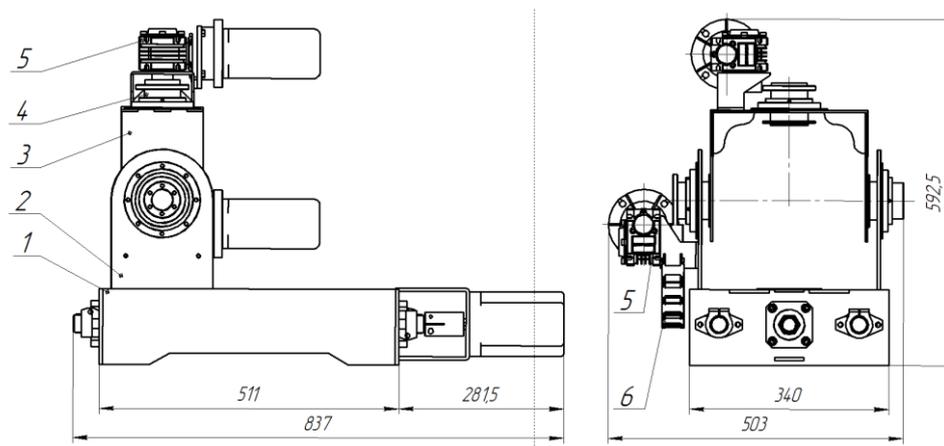
по $q(\lambda_{\text{ср. диф.}})$ определим $\pi(\lambda_{\text{ср. диф.}})$, и далее

$$P_{\text{ср. диф.}} = \pi(\lambda_{\text{ср. диф.}}) \cdot P_{\text{вх. диф.}}^* \quad (35)$$

Анализ приведенного расчета основных параметров диффузора для разных углов раскрытия показал, что при $\delta = 2^\circ$ достигается торможение потока с давлением на выходе $P_{\text{вых. диф.}} = 1,61 \text{ кгс/см}^2$.

Рабочая камера.

Рабочая камера АТ выполнена в виде камеры Эйфеля. На рис. 11 представлена принципиальная схема участка АТ с рабочей камерой. К передней стенке камеры (2) крепится сопло (5) и переходник (1). На задней стенке (7) через герметичный зажим (8) введен диффузор, состоящий из цилиндрической части (10), конической (11) и входного съемного козырька (9). Расстояние от среза сопла до входа в диффузор – $L_{р. ч.}$ может меняться от 300 до 400 мм, т.е. от 2,7 до 3,6 калибра среза сопла. Боковые сдвижные стенки (6) рабочей камеры прозрачные выполненные из оргстекла толщиной 20 мм и используются для визуальных наблюдений и видеокамеры. Крайние положения исследуемых гребенок показаны пунктирной линией (13). Поперечное сечение рабочей камеры определяется габаритами координатного устройства. На рис. 12 представлен общий вид координатного устройства.



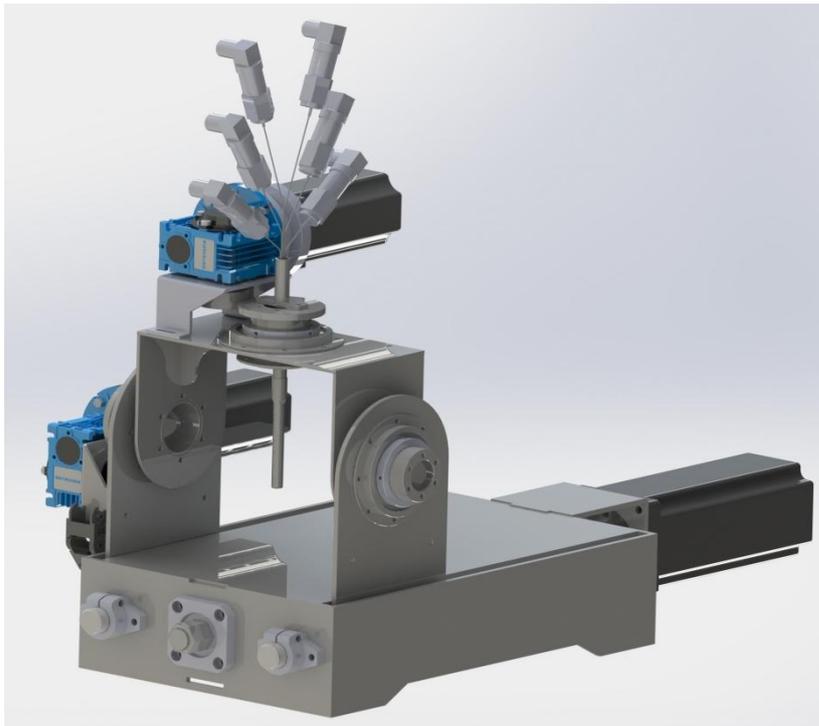


Рис. 12 - Общий вид координатного устройства

1. основа; 2. переключка нижняя; 3. переключка верхняя; 4. стакан; 5. привод; 6. короб проводной гибкий.

Размер координатного устройства связан с размером газовой струи, так как его элементы должны с запасом быть вынесены из зоны воздушного потока. В потоке находится только рабочая часть гребенки.

Приспособление для закрепления гребенки разрабатывается под конкретный экземпляр гребенки и устанавливается на координатное устройство.

Координатное устройство позволяет плавно, с возможностью регулирования значения скорости, перемещать приемное отверстие исследуемого приемника в пределах рабочей части АТ, позиционировать его (при необходимости) на геометрической оси сопла и изменять угол между вектором скорости потока и осью приемного отверстия в диапазоне от минус 45° до $+45^\circ$ в тангенциальной и

меридиональной плоскостях. Линейное перемещение и позиционирование с дискретностью не более 1 мм и погрешностью $\pm 0,5$ мм, обеспечивается шариковинтовой парой приводимой в движение шаговым двигателем с энкодером, Угловое перемещение осуществляется шаговым двигателем с энкодером, с дискретностью позиционирования 1° и погрешностью $\pm 0,5^\circ$, вал шагового двигателя углового перемещения жестко соединён с червячным редуктором с передаточным отношением 1/30-60. Выходной вал редуктора соединен с ведущей шестерней понижающей шестеренчатой прямозубой передачи. Выбор люфта в данном зацеплении осуществляется посредством преднатяга. В пределах рабочей части АТ скорость линейных и угловых перемещений приемного отверстия гребенки регулируется программно, изменением количества оборотов валов шаговых двигателей, отвечающих за линейное или угловое перемещение. Выбранное значение скорости обеспечивает промежуток времени длительности не более 4 мин в течение, которого на всех выбранных скоростях потока (не более четырех) для каждого приемного отверстия будет выполнено позиционирование всех линейных и угловых положений (не более 20 и 20 соответственно) и выполнены все необходимые измерения.

Управление движением координатного устройства (СУДКУ) осуществляется контроллером входящим в состав автоматизированной измерительной системы сбора и обработки информации с датчиков (АИС). СУДКУ исполняет алгоритмы движения и позиционирования приемных отверстий исследуемой гребенки в соответствии с программами, заложенными в АИС.

Программы составляются индивидуально под каждый исследуемый приемник.

Схема АИС представлена на рис. 13.

АИС состоит из персонального компьютера (ПК) оператора, контроллера в который вставлены терминальные блоки токовых датчиков и блок управления и обеспечивает:

- обработку и представление результатов измерений в кодах физических величин;
- отображение результатов измерения в физических единицах на мониторе с последующей распечаткой протокола;
- создание программ управляющих движением координатного устройства;
- представляет форму, вид и размерность информации по требованию оператора выполняющего исследования;
- формирует протоколы исследований и хранит их в электронном виде;
- обеспечивает построение графических зависимостей по принципу – любой параметр в функции от любого другого или в функции от расчетного параметра. Возможность автоматического масштабирования, по максимуму и минимуму каждого из действующих параметров и наличия поля экрана.

АИС осуществляет опрос и регистрацию значений следующих датчиков:

- Датчики избыточного давления Корунд-ДИ-001, сигнал с датчиков от 4 до 20 мА, основная погрешность $\pm 0,15$ %;
- Датчики абсолютного давления Корунд-ДА-001, сигнал с датчиков от 4 до 20 мА, основная погрешность $\pm 0,15$ %;

- Термосопротивление ДТС 125Л-100М.0,5.60И, сигнал с датчика от 4 до 20 мА, основная погрешность $\pm 0,15$ %;
- Расходомер воздуха Эмис-ТЭРА-280, сигнал с датчиков от 4 до 20 мА, основная погрешность ± 2 %;
- Энкодеры системы позиционирования цифровой сигнал протокол RS232, точность позиционирования $\pm 0,5$ мм для линейного перемещения и $\pm 0,5^\circ$ для углового.

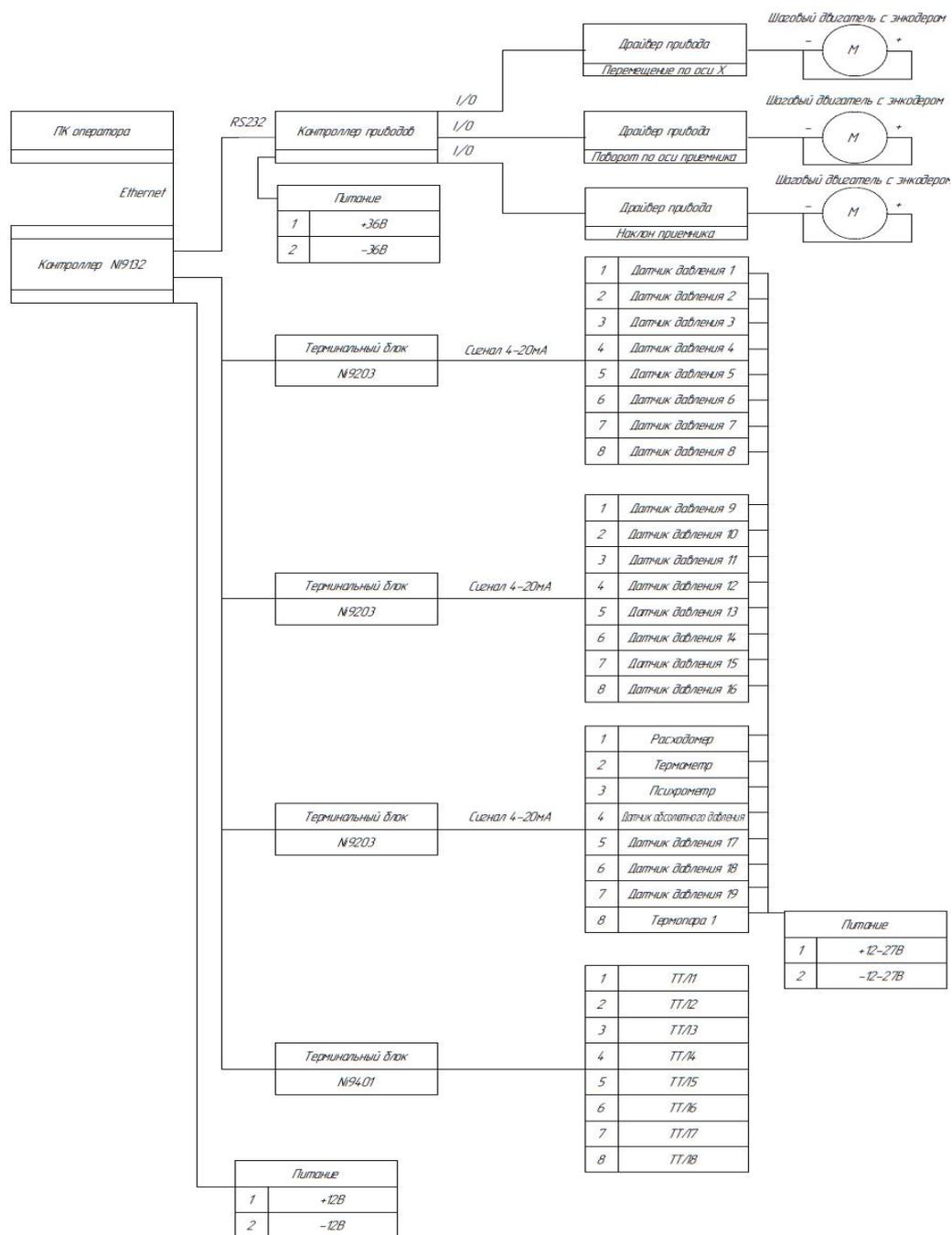


Рис. 13 Автоматизированная измерительная система

Предложенное количество и типы датчиков необходимы для достижения следующих целей:

- определение параметров избыточного давления набегающего на приемник потока с погрешностью $\pm 0,3\%$ от измеряемого значения.

– определение параметров температуры набегающего на приемник потока с погрешностью $\pm 0,3$ % от измеряемого значения.

– определение параметров линейного и углового позиционирования с точностью позиционирования $\pm 0,5$ мм для линейного перемещения и $\pm 0,5^\circ$ для углового

Размещение датчиков и длины пневмолиний к ним исключают появление дополнительных погрешностей к результатам измерений.

Создание трехмерных моделей и конструкторской документации.

Создание математической модели (трехмерной модели), показанной на рис. 14, выполнялось с применением инженерной системы NX10 от компании SIEMENS. Таким образом созданный виртуальный стенд полностью параметризован. В свою очередь это позволило сократить время разработки. Также стоит отметить, что наличие в NX10 модуля MANUFACTURING (Обработка), позволяет составить технологию обработки деталей стенда на станки с числовым программным управлением. При проектировании деталей узлов и агрегатов стенда особый упор делался на технологичность.

При проверке расчетов параметров потока использовался метод конечно-элементного анализа, который потребовал геометрию. Такой геометрией и послужила созданная трехмерная модель со всем полным набором деталей.

Конструкторская документация изготовлена в системе автоматизированного проектирования (САПР) «Компас» российской компании Аскон, с выполнением требований ГОСТов по ЕСКД и ЕСДП. Проекционный вид сборочного чертежа в

САПР «Компас» представлен на рис.15. Межформатная передача моделей осуществлена по средствам промежуточного формата Parasolid (X.t.).

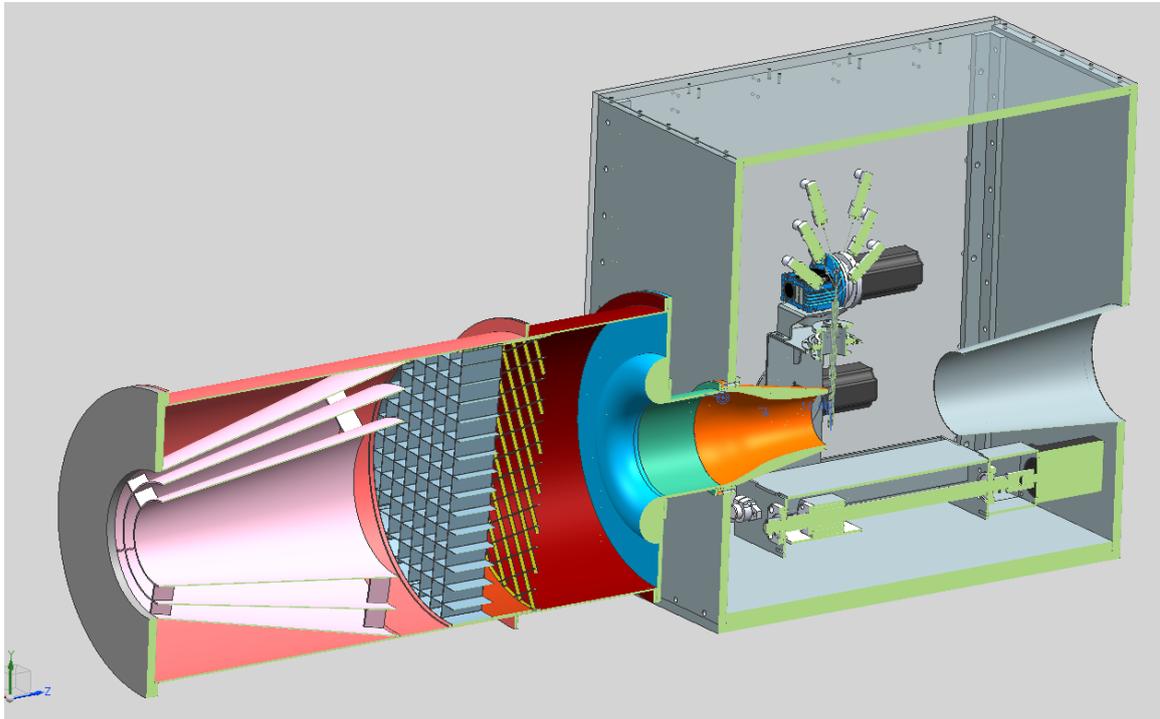


Рис. 14 Продольный разрез математической модели.

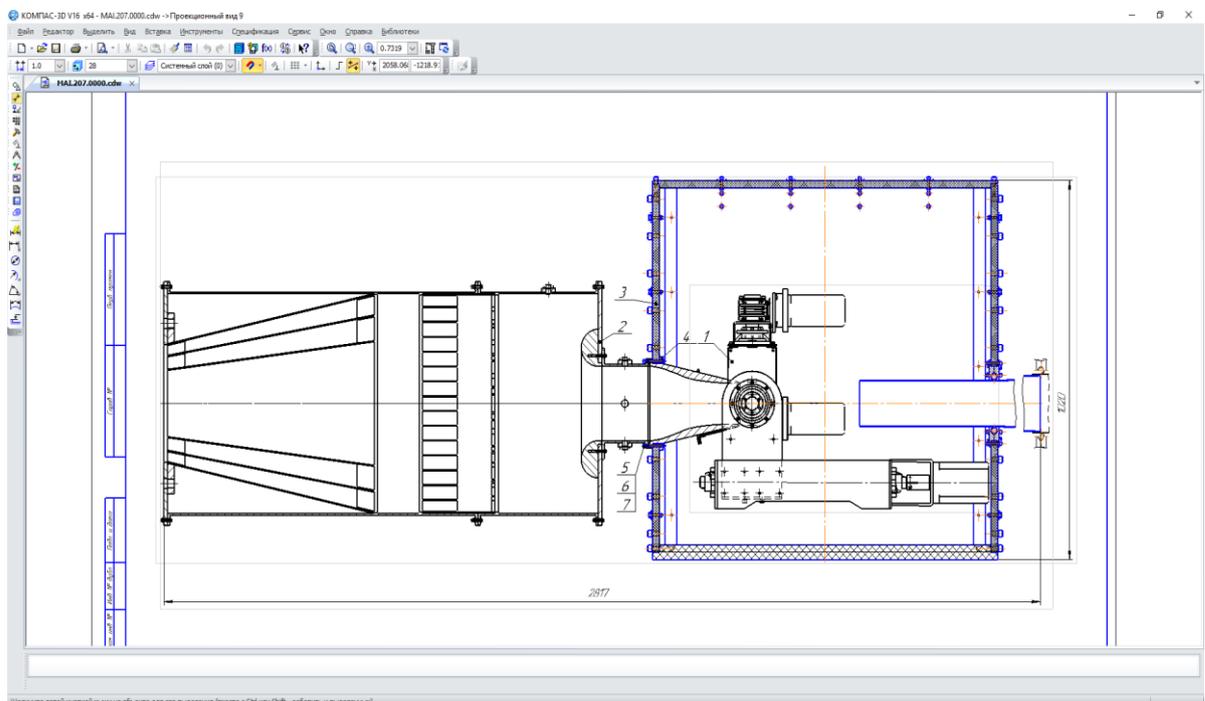


Рис. 15 Проекционный вид сборочного чертежа в САПР «Компас».

Выводы

Разработанный стенд может быть использован для градуировки различных измерительных систем разрабатываемых и используемых для измерения полных и статических давлений в широком диапазоне скоростей набегающего газового потока [6], а также для подтверждения результатов математического моделирования спектра обтекания воздушным потоком новых конструкций приемников давлений [7].

Библиографический список

1. Захаров Д.Л. Отработка методики измерений полей скоростей и концентраций с помощью PIV в течениях характерных для газо-турбинных двигателей // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=25391>
2. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. – М.: Энергия, 1974. – 592 с.
3. Виноградов Л.В., Лотфулин Ш.Р. Исследование геометрических параметров сопла с контуром Витошинского // Вестник РУДН. Инженерные исследования. 2004. № 2. С. 44-49.
4. Таганов Г.И. Выравнивающее действие сетки в потоках жидкости и газов. - М: Труды ЦАГИ, Выпуск 605, 1947. - 14 с.
5. Герман Р. Сверхзвуковые входные диффузоры. - М.:Физматгиз, 1960. - 290с.
6. Костюков В.М., Чан К.Д. Исследование статических и динамических характеристик процесса измерения давления атмосферы в приемнике воздушного

давления // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 2. С. 15-24.

7. Ескин В.И., Полуэктов С.П., Рубинов В.И., Кин К.Л., Афанасьев А.С. Исследование точностных характеристик приемников воздушных давлений путем математического моделирования спектра обтекания воздушным потоком // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 5. С. 19-26.