

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Кафедра ракетных двигателей

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Испытания и надежность жидкостных ракетных двигателей»
для студентов специальности 24.05.02 «Проектирование
авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения



Воронеж 2017

Составители: канд. техн. наук А.А. Афанасьев,
канд. техн. наук К.В. Кружаев,
канд. техн. наук Д.П. Шматов

УДК 621.45.015

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Испытание и надежность жидкостных ракетных двигателей» для студентов специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А.А. Афанасьев, К.В. Кружаев, Д.П. Шматов. Воронеж, 2017. 41 с.

Разработанные методические указания предназначены для студентов 5 курса, выполняющих лабораторный практикум по дисциплине «Испытание и надежность жидкостных ракетных двигателей».

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле **NADISPLAB-2017.pdf**.

Ил. 5. Библиогр.: 5 назв.

Рецензент д-р техн. наук, проф. А.В. Кретинин

Ответственный за выпуск зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. В.С. Рачук

Издаётся по решению учебно-методического совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», 2017

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Расчёт доверительного интервала массового расхода газа по испытаниям эталона форсунки

Целью настоящей работы является ознакомление студентов с испытаниями эталона форсунки и расчёта доверительного интервала массового расхода газа

Дробление (распыливание) топлива в ЖРД осуществляется форсунками. Назначение форсунок:

- 1) обеспечить распыл струи жидкости на капли,
- 2) равномерно распределить жидкость по поперечному сечению.

Чертёж форсунки представлен на рис. 1.

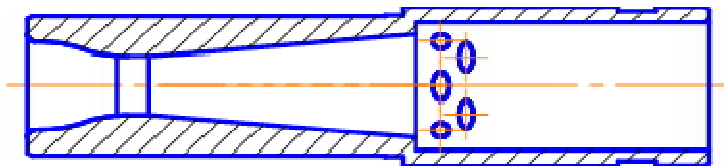


Рис. 1.1. Чертёж форсунки

Перемешивание горючего и окислителя в нужном соотношении является необходимым условием для полного протекания экзотермической реакции. Качество смесеобразования определяется работой головки, которая представляет собой совокупность элементарных смесителей. Элементарным смесителем является наименьшая группа форсунок, служащая для смешения горючего и окислителя в заданных соотношениях. Совершенство работы головки во многом зависит от совершенства работы элементарного смесителя, который состоит из набора форсунок с одинаковыми расходами. Поэтому определять расходы через форсунку необходимо с наибольшей точностью.

Погрешности измерений и измерительных средств

При проведении любого измерения всегда имеются объективные и субъективные причины, приводящие к отклонению полученного результата измерения от истинного значения измеряемой физической величины. никакое измерение не может быть выполнено абсолютно точно. Погрешности средств измерения и нормы на них являются важнейшими метрологическими характеристиками.

Под *точностью измерения* понимают качество измерения, отражающее близость его результата к истинному значению измеряемой величины. При назначении точности измерений следует основываться на анализе последствий, которые наступят в результате допущенных погрешностей. Необходимо учитывать, что назначение неоправданно жестких требований к точности измерений приводит к удорожанию и усложнению процедуры испытания. Потому основное правило техники измерений формулируют следующим образом: *измерять следует не столь точно, насколько это возможно, а так точно, как это необходимо.*

Погрешностью измерения называют отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Чем меньше погрешность измерения, тем выше его точность, и наоборот. Различают абсолютную, относительную и приведенную погрешности.

Абсолютной погрешностью измерения называют погрешность, выраженную в единицах измеряемой величины. Её определяют по формуле:

$$\Delta x = |x_{\text{изм}} - x|,$$

где $x_{\text{изм}}$, x — измеренное и истинное значения измеряемой величины соответственно.

Под *относительной погрешностью* понимают отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta = \Delta x / x .$$

На практике часто относительная погрешность выражается в процентах:

$$\delta_{\%} = (\Delta x / x) \cdot 100\% .$$

По характеру проявления погрешности измерения подразделяют на систематические, случайные и грубые.

Систематическая погрешность - это составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или изменяющаяся по известному закону при повторных измерениях одной и той же величины одним и тем же методом. Причинами систематических погрешностей могут быть: смещение стрелки или шкалы прибора относительно нормального положения, неправильное постоянное положение наблюдателя относительно прибора, неточность градуировки, влияние параметров окружающей среды, постоянных в процессе проведения ряда испытаний (например, температуры воздуха) и др.

Систематическую погрешность можно исключить путем реализации специальных методов измерения. Приведем пример такого рода.

Систематические погрешности средств измерений чаще всего исключают введением поправок или соответствующей организацией регистрации результатов измеряемых параметров. Для этой цели используют, например, данные индивидуальных или стандартных градуировок измерительных приборов, или измерительной цепи в целом. Необходимо также учитывать, что освободиться от постоянной систематической погрешности средств измерения путем обработки результатов измерения нельзя, так как она сохраняется при каждом единичном измерении и не уменьшается при осреднении результатов, т. е. многократные измерения не приводят к уменьшению систематической погрешности.

Случайная погрешность — это составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Такая

погрешность возникает при влиянии различных случайных факторов, которые могут изменяться от измерения к измерению, и поэтому результаты повторных измерений одной и той же величины отличаются друг от друга. Поскольку случайная погрешность, по определению, носит случайный характер, то она может принимать те или иные значения с определенной вероятностью. Чаще всего случайная погрешность распределена по нормальному закону.

Числовой характеристикой случайной погрешности измеряемой величины может служить предельная погрешность. Под *предельной погрешностью* понимают такой интервал, который выражается максимальным по абсолютному значению отклонением случайной величины от ее среднего значения x^* с заданной вероятностью. Такая вероятность представляет собой степень достоверности полученного результата при измерениях, и ее называют *доверительной вероятностью результата измерений*.

Если через $P(x)$ обозначить заданную погрешность, то можно записать

$$P(x) = \text{Вер}(x^* - \Delta < x < x^* + \Delta),$$

где Δ - предельная погрешность.

Удвоенное значение предельной погрешности 2Δ (интервал значений от $-\Delta$ до $+\Delta$) называют доверительным интервалом погрешности измерений.

Случайная погрешность в силу своей природы не может быть устранена введением поправок, но ее возможное значение оценивают методами теории вероятностей и математической статистики.

Уменьшение значения случайной погрешности может быть достигнуто путем проведения многократных измерений. Действительно, в соответствии с известными в теории вероятностей зависимостями, среднее квадратическое отклонение σ_m среднего арифметического в \sqrt{n} раз меньше

среднего квадратического отклонения σ результата единичного измерения:

$$\sigma_m = \sigma / \sqrt{n},$$

где n – число измерений. Так, например, если вместо одного производят четыре измерения при постоянном значении σ , то точность повышается в два раза, при девяти измерениях – в три раза и т.д.

При заданной вероятности $P(x)$ и известном значении среднего квадратического отклонения σ предельную погрешность при единичном измерении находят по формуле:

$$\Delta = u_p \sigma,$$

где u_p - квантиль нормированного нормального распределения при заданной вероятности $P(x)$.

Если значение среднего квадратического отклонения неизвестно, то предельную погрешность определяют так:

$$\Delta = t_p S^*,$$

где t_p - квантиль распределения Стьюдента при заданной вероятности $P(x)$; S^* - статистическая оценка среднего квадратического отклонения результата измерений, которую рассчитывают по результатам n измерений измеряемой величины x_i :

$$S^* = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}^*)^2}.$$

Таким образом, случайная погрешность характеризуется двумя параметрами: значением самой погрешности и ее доверительной вероятностью.

Грубая погрешность – это погрешность измерения, существенно превышающая ожидаемую погрешность при данных условиях. Причинами грубых погрешностей могут быть ошибки персонала (испытателей), неисправность или неверная эксплуатация средств измерений и др. Результаты

измерения, значительно отличающиеся от остальных (грубые погрешности), исключают и не подвергают дальнейшему анализу.

Для определения расхода газа, прошедшего через форсунку при газодинамических испытаниях, необходимо определить погрешность измерения.

Оценку погрешности следует указывать либо в абсолютной форме в единицах измеряемой величины, либо в относительной форме.

Описание установки

Гидрогазодинамический учебный стенд предназначен для проведения газодинамических испытаний узлов и агрегатов ЖРД с целью определения сопротивления газовых трактов, определения полей давлений, скоростей потока, перепадов давлений в различных сечениях в диапазоне расходов воздуха от $0,25 \cdot 10^{-3}$ кг/с до 0,300 кг/с.

На стенде проводятся учебные и экспериментальные испытания эталонных форсунок и контрольных гидравлических сопротивлений на модельных режимах.

Рабочее тело воздух 2 категории ОСТ 92-1577-78.

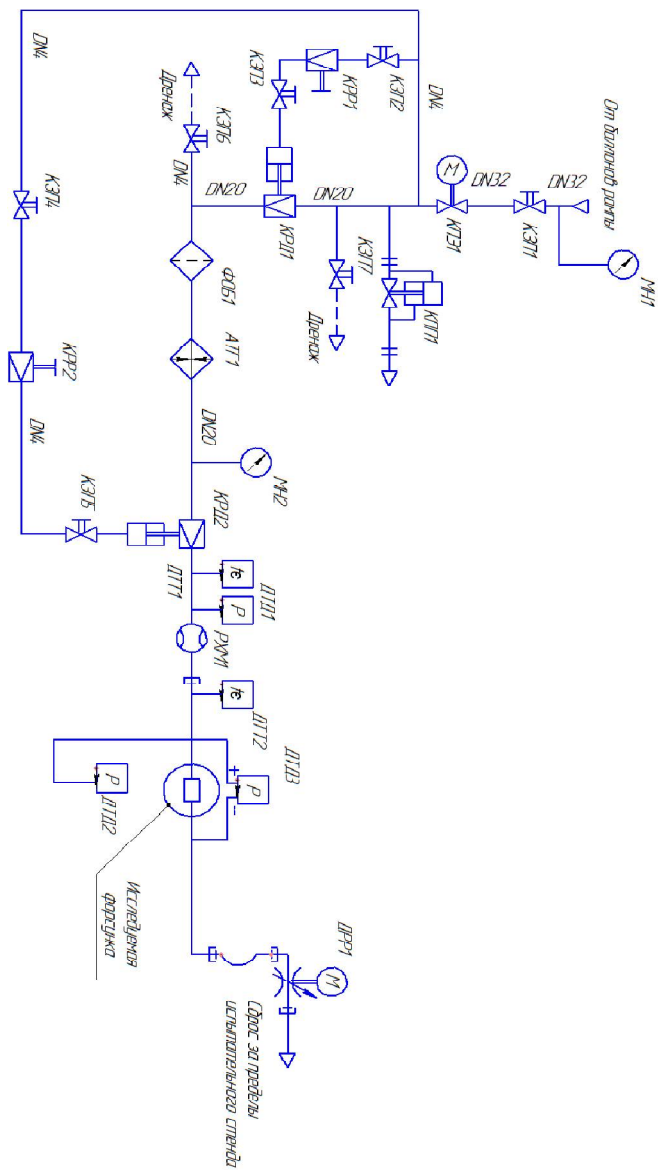


Рис. 1.2. Схема рабочей установки

В данной схеме: АТГ1 – электроподогреватель воздуха, ДРР1 – дроссель, ДТД1, ДТД2 – преобразователь давления(датчик давления), ДТД3 – преобразователь перепада давления, ДТТ1, ДТТ2 – датчик температуры, КЗП1 – вентиль Т130, КЗП2-КЗП7 – вентиль У1-01А.00.00, КПП1 – клапан предохранительный, КПЭ1 – кран шаровой с электроприводом, КРД1 – редуктор дистанционный, КРД2 – редуктор дистанционный, КРР1,2 – редуктор с ручным управлением, МН1 – манометр МТИ 10 Мпа, кл.0,6%, МН2 – манометр МТИ 25 Мпа, кл.0,6%, РХМ1 – расходомер, ФОБ1 – фильтр.

Питание воздухом высокого давления осуществляется от воздушной баллонной рампы по трубопроводу DN10.

Воздух от баллонной рампы поступает через основной вентиль поз. КЗП1, шаровой кран с электроприводом поз. КПЭ1 поступает к дистанционному редуктору поз. КРД1 и далее через фильтр DN10 поз. ФОБ1 и подогреватель воздуха поз. АТГ1. После подогревателей воздух поступает к дистанционному редуктору поз. КРД2 и далее через систему технологических переходников к исследуемой форсунки или контрольному гидравлическому сопротивлению. Газ, пройдя через форсунку, через систему трубопроводов сбрасывается в атмосферу. На выходе установлен дроссель поз. ДРР1. Для безопасности работы предусмотрена система дренажа, состоящая из вентиля поз. КЗП6 и предусмотрен предохранительный клапан поз. КПП1. Кроме того осуществляется отбор воздуха на управление дистанционными редукторами с помощью редукторов командного воздуха поз. КРР1 и поз. КРР2.

На рис. 1.3 приведена схема установки. Испытуемая форсунка установлена в специальной технологической оснастке согласно рисунку.

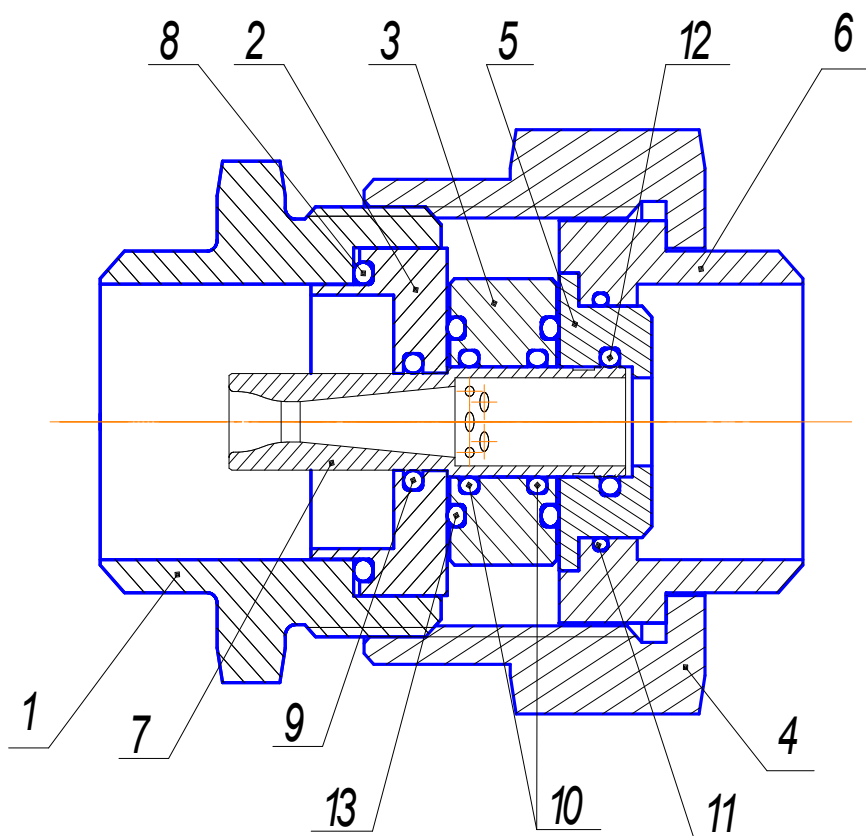


Рис 1.3. Схема установки для испытаний:

- 1 – переходник входа, 2 – вставка, 3 – заглушка,
 4 – гайка накидная, 5 – вставка, 6 – переходник выхода,
 7 – форсунка, 8 – кольцо уплотнительное,
 9 - кольцо уплотнительное, 10 - кольцо уплотнительное,
 11 - кольцо уплотнительное, 12 - кольцо уплотнительное,
 13 - кольцо уплотнительное

Порядок проведения работы

При проведении работы исследуется несколько форсунок с различными расходными характеристиками.

Работу проводить под контролем преподавателя в следующем порядке:

1. Проверить исходное состояние арматуры:
 - вентили поз. КЗП1 – КЗП5 закрыты;
 - вентили поз. КЗП6, КЗП7 открыты;
 - шаровой кран поз. КПЭ1 закрыт;
 - редуктора с ручным управлением поз. КРР1, КРР2 разгружены (шток редуктора выкручен против часовой стрелки до упора);
 - дроссель поз. ДРР1 открыт.
2. Смонтировать исследуемую форсунку (форсунка для проведения лабораторной работы выдаётся преподавателем).
3. Включить электроподогреватель и нагреть его до 40 °С.
4. Запустить информационно-измерительную систему с выводом параметров на ЭВМ.
5. Открыть вентили поз. КЗП1-КЗП5, закрыть вентили поз. КЗП6, КЗП7.
6. Открыть шаровой кран поз. КПЭ1 с помощью электропривода из пультовой стенда.
7. Дистанционным редуктором поз. КРД1, с помощью редуктора с ручным управлением поз. КРР1 (из пультовой стенда), задать величину давления в полости между дистанционным редуктором поз. КРД1 и КРД2 на 2 МПа превышающее заданное преподавателем давление. Величину давления контролировать по манометру поз. МН2.
8. Выставить требуемые (заданные преподавателем) условия испытаний. Дистанционным редуктором поз. КРД2, с помощью редуктора с ручным управлением поз. КРР2 (из пультовой стенда), задать величину давления и перепад давления на входе в форсунку согласно выданному преподавателем заданию. Для корректировки величины перепада необходимо использовать дроссель с

электроуправлением поз. ДРР1. Для уменьшения величины перепада давления необходимо дроссель закрывать, для увеличения – открывать соответственно. Закрытие и открытие дросселя производить короткими нажатиями тумблера на пульте управления. Величину давления и перепада давления контролировать по датчикам поз. ДТД2, ДТД3.

9. Произвести запись следующих полученных значений:
 - давление воздуха на входе в сопло расходомера (показания датчика поз ДТД1);
 - температуру воздуха на входе в сопло расходомера (показания датчика поз ДТТ1);
 - давление воздуха на входе в форсунку (показания датчика поз ДТД2);
 - перепад давления воздуха на форсунке (показания датчика поз ДТД3);
 - температуру воздуха на входе в форсунку (показания датчика поз ДТТ2).
10. Повторить измерения по пункту 9 семь раз.
11. Плавно разгрузить редуктора с ручным управлением поз. КРР1, КРР2 (из пультовой станда).
12. Закрыть шаровой кран поз. КПЭ1.
13. Открыть вентили поз. КЗП6, КЗП7.
14. Отключить информационно-измерительную систему.
15. После сброса избыточного давления до нуля (контроль по манометру МН2), привести арматуру станда в исходное положение.

Обработка результатов опыта

1. Массовый расход газа через форсунку (рассчитывается для каждого измерения)

$$\dot{m}_{изм} = \mu \cdot \xi \cdot F \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \cdot \sqrt{\frac{k}{R}} \cdot \frac{p_c}{\sqrt{T_c}}, \left(\frac{KZ}{c} \right) \quad (1.1)$$

где $F = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \text{ м}^2$ – площадь минимального сечения сужающего устройства;

$d_c = 2,076 \cdot 10^{-3}$ м – диаметр сужающего устройства расходомера (или выдаётся преподавателем);

$$p_c = \frac{P_{c.изм} + P_{бар}}{10,1972} - \text{давление газа перед сужающим}$$

устройством ($P_{c.изм}$ – показания датчика поз ДТД1), 10^6 Па ;

$P_{бар}$ – барометрическое давление (выдаётся преподавателем), $\frac{кгс}{см^2}$;

T_c – температура газа перед сужающим устройством, К;

$$R = 287,1 \frac{Дж}{кг \cdot К} - \text{газовая постоянная для воздуха;}$$

$k = 1,40$ – показатель изобэнтропы совершенного газа для воздуха;

$\mu_{2,076} = 0,938293$ – коэффициент расхода расходомера с диаметром сужающего устройства 2,076 мм (выдаётся преподавателем в случае использования другого расходомера);

ξ – термодинамический коэффициент расхода (выбираем из таблицы, приложение А).

2. Определение приведённого расхода газа (рассчитывается для каждого измерения)

$$\dot{m}_{пр} = \dot{m}_{изм} \cdot \sqrt{\frac{P_{вх.ном} \cdot \Delta p_{ном} \cdot T_{изм}}{P_{вх.изм} \cdot \Delta p_{изм} \cdot T_{ном}}}, \quad (1.2)$$

где $\dot{m}_{изм}$ – измеренный при испытаниях расход газа, кг/с;

$$\Delta p_{изм} = \frac{\Delta p}{10,1972} - \text{измеренный при испытаниях перепад}$$

давления на форсунке (Δp – показания датчика поз ДТД3), МПа;

$p_{вх.изм} = \frac{p_{вх} + p_{бар}}{10,1972}$ - измеренное при испытаниях давление

газа на входе в форсунку ($p_{вх}$ – показания датчика поз ДТД2), МПа;

$T_{изм}$ - измеренная при испытаниях температура газа на входе в форсунку (показания датчика поз ДТТ2, переведенные в К), К;

$\Delta p_{ном}$ - номинальный параметр перепада давления по заданию преподавателя на испытываемую форсунку, МПа;

$p_{вх.ном}$ - номинальный параметр входного давления газа по заданию преподавателя на испытываемую форсунку, МПа;

$T_{ном}$ – номинальные параметры температуры газа по заданию преподавателя на испытываемую форсунку, К.

3. Среднеквадратичное отклонение расхода полного объёма испытаний

$$S_0(\dot{m}_{np}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\dot{m}_{инр} - \dot{m}_{np.ср})^2}{n-1}}, \quad (1.3)$$

где $\dot{m}_{нрi}$ – экспериментально определённое значение приведённого массового расхода, кг/с;

$\dot{m}_{np.ср}$ – среднее арифметическое для диапазона изменений аргумента значение приведённого массового расхода, кг/с;

n – количество экспериментальных точек.

4. Предел абсолютной погрешности измерения расхода

$$\Delta_C(m) = \pm \lambda(v; p) \times S_0(\dot{m}), \quad (1.4)$$

где $\lambda(v; p) = 2,37$ – коэффициент, учитывающий процент последующих повторных значений параметра в интервале $\Delta_c(m)$ с принятой доверительной вероятностью $P=0,95$.

5. Предел относительной случайной погрешности

$$\delta_c(m) = \pm \frac{\Delta c(m)}{m_{np.cp} \times 1000} \times 100, \% \quad (1.5)$$

6. Предел относительной систематической погрешности измеренного расхода (рассчитывается для каждого измерения)

$$\delta_o(m) = \pm \sqrt{(\delta_o(\mu))^2 + (\delta_o(p_c))^2 + \frac{1}{4}(\delta_o(T_c))^2}, \% \quad (1.6)$$

где $\delta_o(\mu) = 0,2417\%$ – относительная систематическая погрешность коэффициента расхода газового расходомера, откалиброванного на установке для калибровки газовых расходомеров весовым способом, %;

$$\delta_o(p_c) = \pm \sqrt{\left(\frac{k \cdot p_{cmax}}{p_c}\right)^2 + \left[\frac{p_{бар}}{p_{сизм}} \cdot \left(\frac{k_{бар} \cdot 100}{p_{бар.M}}\right)\right]^2 + [\delta_o(лин_{p_c})]^2}. \quad (1.7)$$

- предел относительной систематической погрешности измерения давления перед сужающим устройством расходомера, %;

$k = 0,1\%$ – класс точности прибора (погрешность прибора, отнесённая к верхнему пределу измерений);

$k_{бар} = 0,8 \text{ мм.рт.ст}$ – абсолютная погрешность прибора измерения барометрического давления;

$p_{бар}$ – барометрическое давление, $\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

$p_{бар.M}$ – барометрическое давление, мм.рт.ст;

$\delta_0(\text{лин}_{p_c}) = 0,1\%$ – относительная погрешность обработки и регистрации измерительного канала датчика давления, %;

$$p_{C\max} = \frac{60 + p_{\text{бар}}}{10,1972} \text{ МПа} - \text{верхний предел измерения датчика}$$

давления;

p_C – показание датчика в процессе измерения давления, МПа;

$$\delta_0(T_C) = \pm \sqrt{\left[\frac{A \cdot 100}{T_C} \right]^2 + \left[\frac{A_{\text{лин.}T_C} \cdot 100}{T_C} \right]^2} \quad (1.8)$$

- предел относительной систематической погрешности измерения температуры перед сужающим устройством расходомера, %;

T_C – температура газа перед сужающим устройством расходомера, $^{\circ}\text{C}$;

$A = \left(\frac{12}{R_T} \right) + \left(\frac{4}{1000} \right) \cdot t_C$ – абсолютная погрешность прибора измерения температуры, $^{\circ}$;

t_C – температура газа перед сужающим устройством расходомера в $^{\circ}\text{C}$;

$R_T = 52,92 \text{ Ом}$ – сопротивление датчика температуры;

$A_{\text{лин.}T_C} = 0,3^{\circ}$ – абсолютная погрешность обработки и регистрации измерительного канала датчика температуры.

7. Предел относительной систематической погрешности приведённого расхода (рассчитывается для каждого измерения)

$$\delta_0(m_{\text{пр.}}) = \pm \sqrt{\left[\delta_0(m) \right]^2 + \frac{1}{4} \left[\delta_0(\Delta p_{\text{изм}})^2 + \delta_0(p_{\text{ex}})^2 + \delta_0(T_{\text{ex}})^2 \right]} \quad (1.9)$$

где

$$\delta_0(p_{ex}) = \pm \sqrt{\left(\frac{k \cdot p_{ex,max}}{p_{ex,изм}}\right)^2 + \left[\frac{p_{бар}}{p_{ex,изм}} \cdot \left(\frac{k_{бар} \cdot 100}{p_{бар,М}}\right)\right]^2} + [\delta_0(лин_{p_{ex}})]^2 \quad (1.10)$$

- предел относительной систематической погрешности измерения давления перед форсункой, %;

$k = 0,1$ – класс точности прибора (погрешность прибора, отнесённая к верхнему пределу измерений), %;

$\delta_0(лин_{p_{ex}}) = 0,1\%$ – относительная погрешность обработки и регистрации измерительного канала датчика давления;

$p_{ex,max}$ – верхний предел измерения датчика давления (выдаётся преподавателем);

$p_{ex,изм}$ – показание датчика в процессе измерения давления, МПа;

$$\delta_0(\Delta p_{изм}) = \pm \sqrt{\left(\frac{k \cdot \Delta p_{max}}{\Delta p_{изм}}\right)^2 + (\delta_0(лин_{\Delta p}))^2} \quad (1.11)$$

- предел относительной систематической погрешности измерения перепада давления на форсунке, %;

Δp_{max} – верхний предел измерения датчика перепада давления (выдаётся преподавателем);

$\Delta p_{изм}$ – показание датчика перепада давления в процессе измерения давления;

$\delta_0(лин_{\Delta p}) = 0,1\%$ – относительная погрешность обработки и регистрации измерительного канала датчика давления, %;

$$\delta_0(T_{ex}) = \pm \sqrt{\left[\frac{A \cdot 100}{T_{ex}}\right]^2 + \left[\frac{A_{лин.T_{ex}} \cdot 100}{T_{ex}}\right]^2} \quad (1.12)$$

- предел относительной систематической погрешности измерения температуры перед форсункой, %.

T_{ex} – температура газа перед форсункой, К;

$$A = \left(\frac{12}{R_T} \right) + \left(\frac{4}{1000} \right) \cdot t_{ex} - \text{абсолютная погрешность прибора}$$

измерения температуры, $^{\circ}$;

t_{ex} – температура газа перед форсункой в $^{\circ}$ С;

$R_T = 52,92 \text{ Ом}$ – сопротивление датчика температуры;

$A_{\text{лин.Тex}} = 0,3^0$ – абсолютная погрешность обработки и регистрации измерительного канала датчика температуры.

8. Предел суммарной относительной погрешности измерения расхода

$$\delta(m_{\Sigma}) = \pm \sqrt{[\delta_o(m_{np.})_{CP}]^2 + [\delta_C(m)]^2}, \% \quad (1.13)$$

где $\delta_o(m_{np.})_{CP} = \frac{\delta_o(m_{np.})}{n}$ – среднее значение относительной систематической погрешности приведенного расхода (см.п.7) $\delta_o(m_{np.})$;

$\delta_C(m)$ – предел относительной случайной погрешности измеренного расхода (см. п.5).

9. Абсолютная суммарная погрешность измерения расхода

$$\Delta(m_{np.}) = 0,01 \cdot m_{np.cp} \cdot \delta(m_{\Sigma}), \text{ г/с} \quad (1.14)$$

где $m_{np.cp}$ – (см.п.3); $\delta(m_{\Sigma})$ – (см.п.8)

10. Доверительный интервал расхода, в пределах которого функционирование стенда можно считать приемлемым

$$m_{np.cp} \pm \Delta(m_{np.}), \text{ г/с.} \quad (1.15)$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Расчёт доверительного интервала приведенного перепада давления контрольного гидравлического сопротивления теплообменника

Целью настоящей работы является ознакомление студентов с испытаниями контрольного гидравлического сопротивления теплообменника и расчёта доверительного интервала приведенного перепада давления.

Контрольное гидравлическое сопротивление представляет собой дроссельную шайбу определенного диаметра, изготовленную согласно чертежу. КГС необходимо для оперативного контроля функционирования системы измерения стенда.

Гидравлическое сопротивление характеризуется потерей энергии рабочего тела (жидкости или газа) при её движении через гидравлический тракт.

Гидравлическое сопротивление определяется перепадом давления при заданном расходе рабочего тела (жидкости или газа) или расходом при заданном перепаде давления на исследуемом объекте.

Гидравлическое сопротивление объекта испытаний необходимо определять на основании требований задаваемых разработчиком, а в процессе учебного процесса задаваемых преподавателем.

Требования могут содержать номинальное значение параметров, при которых определяется гидравлическое сопротивление объекта испытаний, применительно к выбранному рабочему телу:

- массовый расход через исследуемый объект;
- давление перед исследуемым объектом или за ним;
- перепад давления на исследуемом объекте при заданном расходе рабочего тела;

- температура рабочего тела.

Также требования могут содержать следующие данные:

- схему распределения рабочего тела по трактам исследуемого объекта;

- последовательность определения гидравлического сопротивления отдельных трактов исследуемого объекта;

- условия истечения рабочего тела из исследуемого объекта;

- предельные отклонения основных параметров.

Рабочим телом при проведении исследований является вода или воздух.

Перед входом в исследуемый объект на расстоянии не менее десяти диаметров трубопровода от места отбора входного давления должен устанавливаться фильтр с размерами ячеек не более половины минимального размера проходного сечения гидравлического тракта исследуемого объекта.

Описание установки

Газодинамический учебный стенд предназначен для проведения газодинамических испытаний узлов и агрегатов ЖРД с целью определения, сопротивления газовых трактов, определения полей давлений, скоростей потока, перепадов давлений в различных сечениях, в диапазоне расходов воздуха от $0,25 \cdot 10^{-3}$ кг/с до 0,300 кг/с.

На стенде проводятся учебные и экспериментальные испытания эталонных форсунок и контрольных гидравлических сопротивлений на модельных режимах.

Рабочее тело воздух 2 категории ОСТ 92-1577-78.

Подводящая магистраль состоит из трубопровода диаметром 32 мм, запорного вентиля поз. КЗП1 и крана шарового с электроприводом поз. КПЭ1. Воздух высокого давления от воздушной рампы подаётся на запорный вентиль поз. КЗП1, затем на кран шаровой поз. КПЭ1, и далее на дистанционный редуктор поз. КРД1. После дистанционного редуктора воздух через фильтр поз. ФОБ1 и подогреватель

поз. АТГ1 поступает к дистанционному редуктору поз. КРД2, с помощью которого осуществляется подача воздуха к исследуемому гидравлическому сопротивлению с необходимыми для исследований параметрами. Управление испытаниями осуществляется из изолированного помещения (пультовой стенда) с помощью редукторов с ручным управлением поз. КРР1, КРР2, служащих для управления дистанционными редукторами поз. КРД1 и КРД2 соответственно. Отбор управляющего (командного) воздуха осуществляется перед дистанционным редуктором поз. КРД1, через запорные вентили поз. КЗП2 и КЗП3. После шарового крана поз. КПЭ1 установлен предохранительный клапан поз. КПП1, необходимый для аварийного снижения избыточного давления в трубопроводе в случае превышения допустимого значения. Дистанционный редуктор поз. КРД1 служит для предварительной подготовки воздуха и подачи его к дистанционному редуктору поз. КРД2 с необходимыми для проведения исследований параметрами. Газ, пройдя через КГС, через систему трубопроводов сбрасывается в атмосферу. На выходе установлен дроссель поз. ДРР1. Для сброса воздуха из трубопроводов стенда, после проведения исследований, предусмотрены два вентиля поз. КЗП6 и КЗП7. Электроподогреватель воздуха поз. АТГ1 служит для нагрева воздуха до необходимой температуры. Расход воздуха определялся с помощью расходомера поз. РХМ1. Контроль значений давления, перепада давления и температуры перед КГС осуществлялся с помощью датчиков температуры поз. ДТТ2 и давления поз. ДТД2 и перепада давления поз. ДТД3. В процессе проведения лабораторной работы обработку и визуализацию сигналов с используемых датчиков, и непрерывную запись осуществляется с помощью информационно-измерительной системы. Для визуального контроля величины давления предусмотрены два манометра поз. МН1, МН2.

На рисунке приведена схема установки.

В данной схеме: АТГ1 – электроподогреватель воздуха, ДРР1 – дроссель, ДТД1, ДТД2 – преобразователь давления(датчик давления), ДТД3 – преобразователь перепада давления, ДТТ1, ДТТ2 – датчик температуры, КЗП1 – вентиль Т130, КЗП2-КЗП7 – вентиль У1-01А.00.00, КПП1 – клапан предохранительный, КПЭ1 – кран шаровый с электроприводом, КРД1 – редуктор дистанционный, КРД2 – редуктор дистанционный, КРР1,2 – редуктор с ручным управлением, МН1 – манометр МТИ 10 МПа кл.0,6%; МН2 – манометр МТИ 25 МПа, кл.0,6%, РХМ1 – расходомер, ФОБ1 – фильтр.

Порядок проведения работы

При проведении работы исследуется несколько КГС с различными характеристиками.

Работу проводить под контролем преподавателя в следующем порядке:

1. Проверить исходное состояние арматуры:
 - вентили поз. КЗП1 – КЗП5 закрыты;
 - вентили поз. КЗП6, КЗП7 открыты;
 - шаровой кран поз. КПЭ1 закрыт;
 - редуктора с ручным управлением поз. КРР1, КРР2 разгружены (шток редуктора выкручен против часовой стрелки до упора);
 - дроссель поз. ДРР1 открыт.
2. Смонтировать исследуемое контрольное гидравлическое сопротивление (КГС для проведения лабораторной работы выдаётся преподавателем).
3. Включить электроподогреватель и нагреть его до 40 °С.
4. Запустить информационно-измерительную систему с выводом параметров на ЭВМ.
5. Открыть вентили поз. КЗП1-КЗП5, закрыть вентили поз. КЗП6, КЗП7.

6. Открыть шаровой кран поз. КПЭ1 с помощью электропривода из пультовой стенда.

7. Дистанционным редуктором поз. КРД1, с помощью редуктора с ручным управлением поз. КРР1 (из пультовой стенда), задать величину давления в полости между дистанционным редуктором поз. КРД1 и КРД2 на 2 МПа превышающее заданное преподавателем давление. Величину давления контролировать по манометру поз. МН2.

8. Выставить требуемые (заданные преподавателем) условия испытаний. Дистанционным редуктором поз. КРД2, с помощью редуктора с ручным управлением поз. КРР2 (из пультовой стенда), задать величину давления на выходе из КГС и величину расхода через КГС согласно выданному преподавателем заданию. Для корректировки величины давления на выходе необходимо использовать дроссель с электроуправлением поз. ДРР1. Для уменьшения величины давления на выходе из КГС необходимо дроссель поз. ДРР1 открывать, для увеличения величины давления – закрывать соответственно. Закрытие и открытие дросселя производить короткими нажатиями тумблера на пульте управления. Величину давления на выходе контролировать по датчику поз. ДТД2.

9. Произвести запись следующих полученных значений:

- давление воздуха на входе в сопло расходомера (показания датчика поз ДТД1);
- температуру воздуха на входе в сопло расходомера (показания датчика поз ДТТ1);
- давление воздуха на выходе из КГС (показания датчика поз ДТД2);
- перепад давления воздуха на КГС (показания датчика поз ДТД3);
- температуру воздуха на входе в КГС (показания датчика поз ДТТ2).

10. Повторить измерения по пункту 9 семь раз.

11. Плавно разгрузить редуктора с ручным управлением поз. КРР1, КРР2 (из пультыковой станда).
12. Закрыть шаровой кран поз. КПЭ1.
13. Открыть вентили поз. КЗП6, КЗП7.
14. Отключить информационно-измерительную систему.
15. После сброса избыточного давления до нуля (контроль по манометру МН2), привести арматуру станда в исходное положение.

Обработка результатов опыта

1. Массовый расход газа через контрольное гидравлическое сопротивление (рассчитывается для каждого измерения)

$$\dot{m}_{изм} = \mu \cdot \xi \cdot F \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \cdot \sqrt{\frac{k}{R}} \cdot \frac{p_c}{\sqrt{T_c}}, \left(\frac{кг}{с} \right) \quad (2.1)$$

где $F = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \text{ м}^2$ – площадь минимального сечения сужающего устройства;

$d_c = 1,401 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – диаметр сужающего устройства расходомера (или выдаётся преподавателем);

$p_c = \frac{P_{с.изм} + P_{бар}}{10,1972}$ – давление газа перед сужающим

устройством ($P_{с.изм}$ – показания датчика поз ДТД1), 10^6 Па ;

$P_{бар}$ – барометрическое давление (выдаётся преподавателем), $\frac{кгс}{см^2}$;

T_c – температура газа перед сужающим устройством (показания датчика поз ДТТ1), К;

$R = 287,1 \frac{Дж}{кг \cdot К}$ – газовая постоянная для воздуха;

$k = 1,40$ – показатель изоэнтропы совершенного газа для воздуха;

$\mu_{1,401} = 0,9237$ – коэффициент расхода расходомера с диаметром сужающего устройства 1,401 мм (выдается преподавателем в случае использования другого расходомера);

ξ – термодинамический коэффициент расхода (выбираем из таблицы, приложение А).

2. Определение приведённого перепада давления (рассчитывается для каждого измерения)

$$\Delta P_{пр} = -\Delta P_{выхном} + \sqrt{P_{выхном}^2 + \left(\frac{\dot{m}_{ном}}{\dot{m}_{изм}}\right) \cdot \frac{(2 \cdot P_{вых.изм} + \Delta P_{изм}) \cdot \Delta P_{изм} \cdot T_{ном}}{T_{вх}}}, \quad (2.2)$$

где $\dot{m}_{изм}$ – измеренный при испытаниях расход газа, кг/с;

$\Delta p_{изм} = \frac{\Delta p}{10,1972}$ – измеренный при испытаниях перепад давления на КГС (Δp – показания датчика поз ДТДЗ), МПа;

$p_{вых.изм} = \frac{p_{вых} + p_{бар}}{10,1972}$ – измеренное при испытаниях давление газа на выходе из КГС ($p_{вых}$ – показания датчика поз ДТД2), МПа;

$T_{вх}$ – измеренная при испытаниях температура газа на входе в КГС (показания датчика поз ДТТ2, переведенные в К), К;

$\dot{m}_{ном}$ – номинальный параметр расхода по заданию преподавателя на испытуемое КГС, кг/с;

$p_{вых.ном}$ – номинальные параметры входного давления газа по заданию преподавателя на испытуемое КГС, МПа;

$T_{ном}$ – номинальный параметр температуры газа по заданию преподавателя на испытуемое КГС, К.

3. Среднеквадратичное отклонение приведенного перепада давления полного объёма испытаний

$$S_0(\Delta p_{np}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta p_{np_i} - \Delta p_{np.cp})^2}{n-1}}, \quad (2.3)$$

где Δp_{np_i} – экспериментально определённое значение приведённого перепада давления, МПа;

$\Delta p_{np.cp}$ – среднее арифметическое для диапазона изменений аргумента значение приведённого перепада давления, МПа;

n – количество экспериментальных точек.

4. Предел абсолютной погрешности измерения перепада давления.

$$\Delta_c(\Delta p_{np}) = \pm \lambda(v; p) \times S_0(\Delta p_{np}), \quad (2.4)$$

где $\lambda(v; P) = 2,37$ – коэффициент, учитывающий процент последующих повторных значений параметра в интервале $\Delta_c(\Delta p_{np})$ с принятой доверительной вероятностью $P=0,95$.

5. Предел относительной случайной погрешности приведенного перепада давления

$$\delta_c(\Delta p_{np}) = \pm \frac{\Delta_c(\Delta p_{np})}{\Delta p_{np.cp}} \times 100\%. \quad (2.5)$$

6. Предел относительной систематической погрешности измерения перепада давления на КГС (рассчитывается для каждого измерения)

$$\delta_0(\Delta p_{изм}) = \pm \sqrt{\left(\frac{k \cdot \Delta p_{max}}{\Delta p_{изм}}\right)^2 + (\delta_0(лин_{\Delta p}))^2}, \% \quad (2.6)$$

где $k = 0,1$ – класс точности прибора (погрешность прибора, отнесённая к верхнему пределу измерений, выдаётся преподавателем), %;

Δp_{max} – верхний предел измерения датчика перепада давления (выдаётся преподавателем), МПа;

$\Delta p_{изм}$ – показание датчика перепада давления в процессе измерения давления, МПа;

$\delta_0(лин_{\Delta p}) = 0,1\%$ – относительная погрешность обработки и регистрации измерительного канала датчика давления, %.

7. Предел относительной систематической погрешности измерения температуры газа перед КГС (рассчитывается для каждого измерения)

$$\delta_0(T_{ex.изм}) = \pm \sqrt{\left[\frac{A \cdot 100}{T_{ex}}\right]^2 + \left[\frac{A_{лин.Тex} \cdot 100}{T_{ex}}\right]^2}, \% \quad (2.7)$$

где T_{ex} – измеренная при испытаниях температура газа на входе в КГС, К;

$A = \left(\frac{12}{R_T}\right) + \left(\frac{4}{1000}\right) \cdot t_{ex}$ – абсолютная погрешность прибора измерения температуры, $^{\circ}$;

t_{ex} – измеренная при испытаниях температура газа на входе в КГС в $^{\circ}\text{C}$;

$R_T = 52,92 \text{ Ом}$ – сопротивление датчика температуры;

$A_{лин.Тex} = 0,3^{\circ}$ – абсолютная погрешность обработки и регистрации измерительного канала датчика температуры.

8. Предел относительной систематической погрешности измерения давления газа после КГС (рассчитывается для каждого измерения)

$$\delta_0(p_{\text{вых.изм}}) = \pm \sqrt{\left(\frac{k \cdot p_{\text{вых.мах}}}{p_{\text{вых.изм}}}\right)^2 + \left[\frac{p_{\text{бар}}}{p_{\text{вых.изм}}} \cdot \left(\frac{k_{\text{бар}} \cdot 100}{p_{\text{бар.М}}}\right)\right]^2} + [\delta_0(\text{лин}_{P_{\text{вых}}})]^2, \% \quad (2.8)$$

где $\delta_0(\text{лин}_{P_{\text{вых}}}) = 0,1\%$ – относительная погрешность обработки и регистрации измерительного канала датчика давления;

$k_{\text{бар}} = 0,8 \text{ мм.рт.ст}$ – абсолютная погрешность прибора измерения барометрического давления;

$p_{\text{бар}}$ – барометрическое давление, $\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

$p_{\text{бар.М}}$ – барометрическое давление, мм.рт.ст;

$p_{\text{вых.мах}}$ – верхний предел измерения датчика давления (выдаётся преподавателем), МПа;

$p_{\text{вых.изм}}$ – показание датчика в процессе измерения давления, МПа.

9. Предел относительной систематической погрешности измерения температуры газа перед критическим сечением расходомера (рассчитывается для каждого измерения)

$$\delta_0(T_C) = \pm \sqrt{\left[\frac{A \cdot 100}{T_C}\right]^2 + \left[\frac{A_{\text{лин.}T_C} \cdot 100}{T_C}\right]^2}, \% \quad (2.9)$$

где T_C – температура газа перед сужающим устройством расходомера, $^{\circ}\text{C}$;

$A = \left(\frac{12}{R_T}\right) + \left(\frac{4}{1000}\right) \cdot t_C$ – абсолютная погрешность прибора измерения температуры, $^{\circ}$;

t_C – температура газа перед сужающим устройством расходомера в $^{\circ}\text{C}$;

$R_T = 52,92 \text{ Ом}$ – сопротивление датчика температуры;

$A_{\text{лин.}T_C} = 0,3^{\circ}$ – абсолютная погрешность обработки и регистрации измерительного канала датчика температуры.

10. Предел относительной систематической погрешности измерения давления воздуха перед критическим сечением расходомера (рассчитывается для каждого измерения)

$$\delta_0(p_C) = \pm \sqrt{\left(\frac{k \cdot p_{C\max}}{p_C}\right)^2 + \left[\frac{P_{\text{бар}}}{P_{\text{Сизм}}} \cdot \left(\frac{k_{\text{бар}} \cdot 100}{P_{\text{бар.М}}}\right)\right]^2 + [\delta_0(\text{лин}_{p_C})]^2}, \% \quad (2.10)$$

где $\delta_0(\text{лин}_{p_C}) = 0,1\%$ – относительная погрешность обработки и регистрации измерительного канала датчика давления, %

$p_{C\max}$ – верхний предел измерения датчика давления, задается преподавателем, МПа;

p_C – показание датчика в процессе измерения давления, МПа.

11. Предел относительной систематической погрешности измерения массового расхода (рассчитывается для каждого измерения)

$$\delta_o(m) = \pm \sqrt{(\delta_o(\mu))^2 + (\delta_o(p_C))^2 + \frac{1}{4}(\delta_o(T_C))^2}, \% \quad (2.11)$$

где $\delta_o(\mu) = 0,2417\%$ – относительная систематическая погрешность коэффициента расхода газового расходомера, откалиброванного на установке для калибровки газовых расходомеров весовым способом, %.

12. Предел относительной систематической погрешности измерения приведенного перепада давления (рассчитывается для каждого измерения)

$$\delta_0(\Delta p_{np}) = \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(2 \cdot \delta_0(\Delta p_{изм})^2 + 2 \cdot \delta_0(p_{экс.изм})^2 + \delta_0(T_{экс.изм})^2 + \left[\delta_0(m)^2 \right] \right)}, \% \quad (2.12)$$

13. Предел суммарной относительной погрешности измерения приведенного перепада давления.

$$\delta(\Delta p_{\Sigma}) = \pm \sqrt{\left[\delta_0(\Delta p_{np})_{CP} \right]^2 + \left[\delta_C(\Delta p_{np}) \right]^2}, \% \quad (2.13)$$

где $\delta_C(\Delta p_{np})$ – предел относительной случайной погрешности приведенного перепада давления (см. п.5),

$\delta_0(\Delta p_{np})_{CP} = \frac{\delta_0(\Delta p_{np})}{n}$ – среднее значение предела относительной систематической погрешности измерения приведенного перепада давления $\Delta \delta_0(p_{np})$.

14. Предел абсолютной погрешности определения приведенного перепада давления

$$\Delta(\Delta p_{np}) = 0,01 \cdot \Delta p_{np.cp} \cdot \delta(\Delta p_{\Sigma}), \text{ МПа}, \quad (2.14)$$

где $\Delta p_{np.cp}$ – (см.п.2); $\delta(\Delta p_{\Sigma})$ – (см.п.13).

15. Доверительный интервал приведенного перепада давления, в пределах которого функционирование стенда можно считать приемлемым

$$\Delta p_{np.cp} \pm \Delta(\Delta p_{np}), \text{ МПа}. \quad (2.15)$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Расчёт доверительного интервала давления контрольного гидравлического сопротивления при гидродинамических испытаниях по определению величины давления во входном коллекторе смесительной головки

Целью настоящей работы является ознакомление студентов с испытаниями контрольного гидравлического сопротивления смесительной головки и расчёта доверительного интервала входного давления.

Контрольное гидравлическое сопротивление представляет собой дроссельную шайбу определенного диаметра, изготовленное согласно чертежу. КГС необходимо для оперативного контроля функционирования системы измерения стенда.

Описание установки

Гидродинамический учебный стенд предназначен для проведения гидродинамических испытаний узлов и агрегатов ЖРД с целью определения, сопротивления гидравлических трактов, неравномерность расхода воды через форсунки по факелу распыла, определения полей давлений, скоростей потока, перепадов давлений в различных сечениях, в диапазоне расходов воды от $2,0 \cdot 10^{-3}$ кг/с до 6,5 кг/с.

На стенде проводятся учебные и экспериментальные испытания эталонных форсунок и контрольных гидравлических сопротивлений на модельных режимах для различных узлов и агрегатов ЖРД.

Рабочее тело вода техническая по ОСТ-92-0908-80.

На рисунке приведена схема установки.

Вода к исследуемому гидравлическому сопротивлению подается насосом поз. НПП1 из ёмкости подачи поз. БОБ1. Регулирование параметров происходит с помощью дросселя на входе в КГС поз. ДРР1 и на выходе из КГС поз. ДРР2, также возможно регулирование параметров с помощью изменения оборотов ротора насоса. Для осуществления контроля параметров испытаний предусмотрены датчики давления поз. ДТД1, ДТД2, ДТД3, датчик температуры поз. ДТТ1. Контроль величины расхода осуществляется по показаниям расходомера поз. ТПР1. Для визуального контроля величины давления перед дросселем поз. ДРР1 предусмотрен манометр поз. МН1.

Вода после испытаний сливается в ёмкость поз. БОБ2 откуда перекачивается насосом поз. НПП2 обратно в ёмкость подачи поз. БОБ1 (насос запускается автоматически при достижении уровня «mid» на уровнемере ёмкости). Насос поз. НПП1 автоматически отключается в случае достижения максимального уровня в ёмкости поз. БОБ2.

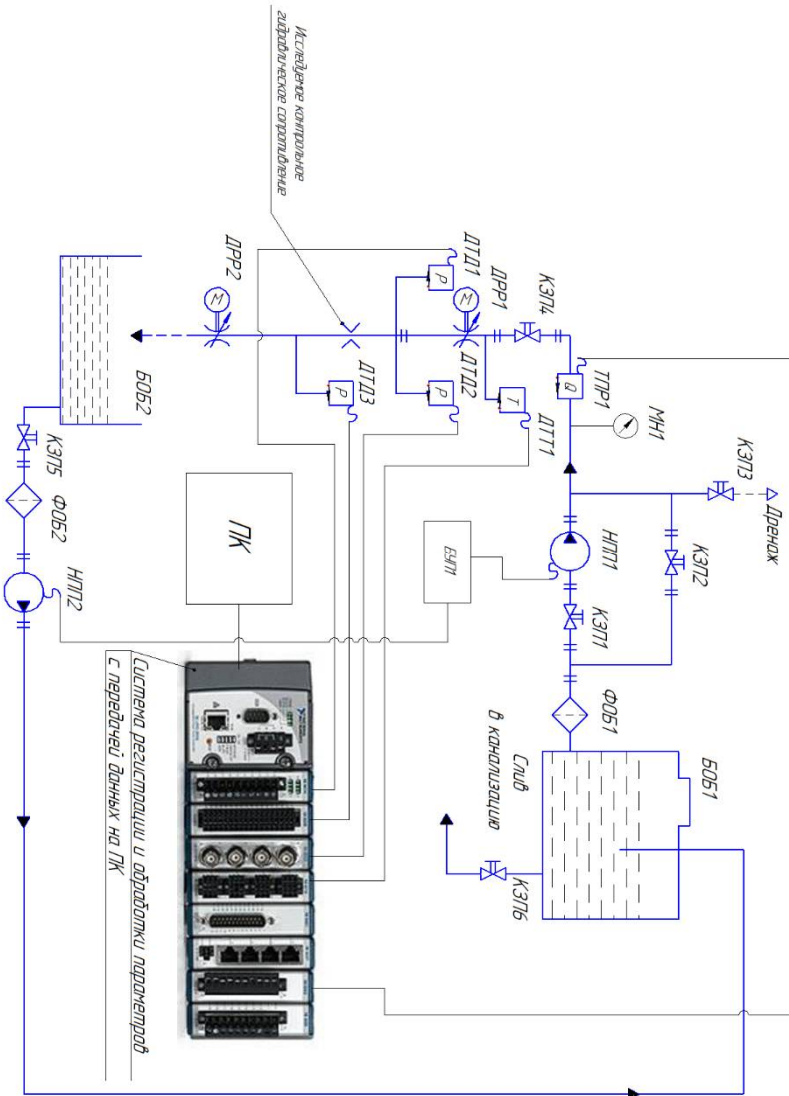


Схема установки

В данной схеме: БОБ1 – ёмкость для подачи воды, БОБ2 – ёмкость для слива воды, БУП1 – блок управления насосами, ДТД1-ДТД3 – преобразователь давления, ДРР1, ДРР2 – дроссель с электроприводом, ДТТ1 – датчик температуры, КЗП1-КЗП6 – вентиль запорный, МН1 – манометр МТИ 1,6 МПа, кл.0,6%; НПП1, НПП2 – насос постоянной производительности, ТПР1 – расходомер турбинного типа (возможно применение расходомера другого типа), ФОБ1, ФОБ2 – фильтр.

Порядок проведения работы

При проведении работы исследуется контрольное гидравлическое сопротивление в переходниках при гидродинамических испытаниях смесительной головки и определению давления во входном коллекторе и при настройке камеры сгорания ЖРД.

Работу проводить под контролем преподавателя в следующем порядке:

1. Проверить исходное состояние арматуры:
 - вентили поз. КЗП1 – КЗП6 закрыты;
 - дросселя поз. ДРР1, ДРР2 открыты;
 - уровень воды в емкости поз. БОБ1 выше нижнего предела (отметки «min» на уровнемере емкости).
2. Смонтировать исследуемое контрольное гидравлическое сопротивление (КГС для проведения лабораторной работы выдаётся преподавателем).
3. Запустить информационно-измерительную систему с выводом параметров на ЭВМ.
4. Открыть вентили поз. КЗП1, КЗП4, КЗП5.
5. Включить насос поз. НПП1.
6. Открыть вентиль поз. КЗП3 и выпустить воздух из системы, закрыть вентиль поз. КЗП3 после дренирования.

7. Выставить требуемые (заданные преподавателем) условия испытаний. Параметры испытаний регулируются дросселями поз. ДРР1 и ДРР2.

8. Произвести запись следующих полученных значений:

- показания расходомера;
- давление воды на входе в КГС (показания датчиков поз ДТД1, ДТД2);
- температуру воды на входе в КГС (показания датчика поз ДТТ1);
- давление воздуха на выходе из КГС (показания датчика поз ДТД3).

9. Повторить измерения по пункту 8 семь раз.

10. Отключить насос поз НПП1 (насос поз НПП2 включается автоматически для откачки воды из ёмкости слива поз БОБ2).

11. Отключить информационно-измерительную систему.

12. После откачки воды из ёмкости слива привести арматуру стенда в исходное положение.

Обработка результатов опыта

1. Среднеквадратичное отклонение измеренного давления на входе полного объёма испытаний

$$S_0(p_{ex}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_{iex} - p_{вх.ср})^2}{n-1}}, \quad (3.1)$$

где p_{exi} – экспериментально определённое значение входного давления, МПа;

$p_{вх.ср}$ – среднее арифметическое для диапазона изменений аргумента значение входного давления, МПа;

n – количество экспериментальных точек.

2. Предел абсолютной погрешности измерения давления на входе

$$\Delta_C(p_{ex}) = \pm \lambda(v; p) \times S_0(p_{ex}), \quad (3.2)$$

где $\lambda(v; P) = 2,37$ – коэффициент, учитывающий процент последующих повторных значений параметра в интервале $\Delta_C(p_{ex})$ с принятой доверительной вероятностью $P=0,95$.

3. Предел относительной случайной погрешности

$$\delta_C(p_{ex}) = \pm \frac{\Delta_C(p_{ex})}{P_{вх.ср}} \times 100\%, \quad (3.3)$$

4. Предел относительной систематической погрешности измерения расхода на КГС (рассчитывается для каждого измерения)

$$\delta_o(m) = \pm \sqrt{\left(\frac{k \cdot m_{max}}{m_{изм}}\right)^2 + [\delta_0(лин_m)]^2} \% \quad (3.4)$$

где $k = 0,1\%$ – класс точности прибора (погрешность прибора, отнесённая к верхнему пределу измерений);

m_{max} – верхний предел измерения расходомера, задается преподавателем, кг/с;

$\delta_0(лин_m) = 0,1\%$ – относительная погрешность обработки и регистрации измерительного канала расходомера, %.

5. Предел относительной систематической погрешности измерения давления на входе (рассчитывается для каждого измерения)

$$\delta_0(p_{ex}) = \pm \sqrt{\left(\frac{k \cdot p_{vx.max}}{p_{ex}}\right)^2 + \left[\frac{p_{бар}}{p_{ex}} \cdot \left(\frac{k_{бар} \cdot 100}{p_{бар.M}}\right)\right]^2 + [\delta_0(лин_{p_{ex}})]^2}, \quad \% \quad (3.5)$$

где $k = 0,1\%$ – класс точности прибора (погрешность прибора, отнесённая к верхнему пределу измерений);

$k_{бар} = 0,8 \text{ мм.рт.ст}$ – абсолютная погрешность прибора измерения барометрического давления;

$p_{бар}$ – барометрическое давление, $\frac{кгс}{см^2}$;

$p_{бар.M}$ – барометрическое давление, мм.рт.ст;

$\delta_0(лин_{p_{ex}}) = 0,1\%$ – относительная погрешность обработки и регистрации измерительного канала датчика давления, %;

$p_{vx.max}$ – верхний предел измерения датчика давления, задается преподавателем, МПа;

p_{ex} – показание датчика в процессе измерения давления, МПа.

6. Предел относительной систематической погрешности приведенного давления на входе (рассчитывается для каждого измерения)

$$\delta_0(\Delta p_{ex.np}) = \pm \sqrt{[\delta_0(p_{ex})]^2 + [\delta_0(m)]^2}, \quad \% \quad (3.6)$$

7. Предел суммарной относительной погрешности измерения давления на входе

$$\delta(p_{ex\Sigma}) = \pm \sqrt{[\delta_0(p_{ex.np})_{CP}]^2 + [\delta_C(p_{ex})]^2}, \quad (3.7)$$

где $\delta_0(p_{ex.np})_{CP} = \frac{\delta_0(p_{ex.np})}{n}$ – среднее значение относительной погрешности измерения давления на входе (см.п.7) $\delta_0(p_{ex.np})$.

8. Абсолютная суммарная погрешность измерения давления:

$$\Delta(p_{ex\Sigma}) = 0,01 \cdot p_{ex.cp} \cdot \delta(p_{ex\Sigma}), \quad (3.8)$$

9. Доверительный интервал входного давления, в пределах которого функционирование стенда можно считать приемлемым:

$$p_{ex.cp} \pm \Delta(p_{ex\Sigma}) \quad (3.9)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ

Термодинамические коэффициенты расхода для воздуха

Давление, МПа	Температура, К								
	240	250	260	270	280	290	300	310	320
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
2	1,0176	1,0156	1,0142	1,0126	1,0114	1,0100	1,0088	1,0076	1,0064
4	1,0355	1,0300	1,0260	1,0225	1,0200	1,0175	1,0150	1,0135	1,0115
6	1,0530	1,0450	1,0390	1,0340	1,0300	1,0265	1,0230	1,0200	1,0175
8	1,0710	1,0600	1,0515	1,0450	1,0395	1,0350	1,0300	1,0265	1,0235
10	1,0885	1,0745	1,0645	1,0560	1,0490	1,0425	1,0370	1,0325	1,0285
12	1,1065	1,0890	1,0770	1,0665	1,0575	1,0500	1,0430	1,0380	1,0335
14	1,1240	1,1030	1,0895	1,0770	1,0665	1,0570	1,0500	1,0430	1,0375
16	1,1400	1,1165	1,1010	1,0870	1,0745	1,0690	1,0555	1,0480	1,0420
18	1,1540	1,1285	1,1110	1,0955	1,0820	1,0705	1,0610	1,0525	1,0455
20	1,1670	1,1395	1,1200	1,1030	1,0880	1,0760	1,0655	1,0565	1,0490
22	1,1790	1,1500	1,1280	1,1100	1,0940	1,0810	1,0700	1,0605	1,0520

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 22763-77. Двигатели ракетные жидкостные. Надежность, контроль и испытания. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 22 с.

2. Надежность и эффективность в технике: справочник: в 10 т. Т. 6: Экспериментальная отработка испытания. М.: Машиностроение, 1989. 376 с.

3. ГОСТ 17655-89. Двигатели ракетные жидкостные. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 58 с.

4. Жуковский, А.Е. Испытания жидкостных ракетных двигателей: учебник для студентов авиац. спец. вузов / А.Е. Жуковский, В.С. Кондрусев, В.В. Окорочков. - 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 352 с.

5. Коломенцев А.И. Обеспечение надежности двигательных установок / А.И. Коломенцев, Г.Б. Осипов. М.: Моск. авиац. ин-т, 1992. 52 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Расчёт доверительного интервала массового расхода газа по испытаниям эталона форсунки.	1
Лабораторная работа № 2. Расчёт доверительного интервала приведенного перепада давления контрольного гидравлического сопротивления теплообменника	18
Лабораторная работа № 3. Расчёт доверительного интервала давления контрольного гидравлического сопротивления при гидродинамических испытаниях по определению давления во входном коллекторе смесительной головки	31
Приложение. Термодинамические коэффициенты расхода для воздуха	39
Библиографический список	40

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Испытания и надежность жидкостных ракетных двигателей»
для студентов специальности 24.05.02 «Проектирование
авиационных и ракетных двигателей»
очной формы обучения

Составители:

Афанасьев Александр Александрович
Кружаев Константин Владимирович
Шматов Дмитрий Павлович

В авторской редакции

Подписано к изданию 15.09.2017.

Уч.-изд. л. 2,5. «С»

ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический
университет"

394026 Воронеж, Московский просп., 14

