

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Калуга, 2012

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана Калужский филиал

С.С. Панаиотти, А.И. Савельев, А.Н. Сизов

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО КУРСУ «МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА»

Методические указания

Калуга, 2012

Рецензент:

канд. техн. наук, доц. Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана А,В, Землянский

Утверждено методической комиссией КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана (протокол №7 от 5.05.2004)

П16 Панаиотти С.С., Савельев А.И., А.Н. Сизов Лабораторные работы по курсу «Механика жидкости и газа»: Методические указания. — Калуга, КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. — 36 с., ил. 19.

Описана малая аэродинамическая труба и методика измерения параметров потока. Изложено содержание лабораторных работ, методика эксперимента обработки данных. Приводится перечень контрольных вопросов. Приложены таблицы и сетки. необходимые для составления протоколов испытаний и построения экспериментальных зависимостей.

Пособие предназначено для студентов специальностей «Гидромашины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» и «Паротурбинные, газотурбинные установки и двигатели»изучающих курс механики жидкости и газа.

Ил. 19. Библиогр. 6 назв.

УДК 532.5 ББК 22.253

 Панаиотти С.С., Савельев А.И., Сизов А.Н.,2004
 КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012

Лабораторная работа №1

Изучение малой аэродинамической трубы

Цель работы – изучить назначение и устройство аэродинамической трубы, методику проведения экспериментальных исследований на ней.

1. Назначение и устройство аэродинамической трубы

Большинство задач экспериментальной механики жидкости и газа связано с изучением движения тел с некоторой скоростью $\vec{V_0}$ в неподвижной на бесконечно большом удалении от тел среде (движение судна, движение крыла самолета и т.п.). Если ко всем частицам жидкости и точкам тела добавить такую же по величине, но противоположную по направлению скорость – $\vec{V_0}$, то движение обращается и имеем задачу обтекания неподвижного теперь тела однородным потоком жидкости или газа со скоростью $\vec{V_0}$ на бесконечности, называемую также *скоростью набегающего или невозмущенного потока*. Во многих случаях удобнее экспериментально исследовать именно такое движение.

Обращенное движение изучается в специальных устройствах – аэродинамических или гидродинамических трубах. Исследуемое тело располагают в рабочем участке трубы и затем перед ним создают равномерный, прямолинейный, установившийся поток жидкости или газа с постоянной скоростью.

Схема простейшей аэродинамической трубы малых скоростей, используемой для проведения лабораторных работ, представлена на рис. 1.1.

Неподвижный воздух засасывается из помещения лаборатории вентилятором 12, установленным на выходе из трубы, и поступает в сопло 2. Сопло ускоряет поток и создает на входе в рабочий участок однородное поле скоростей ($V_0 \approx 20$ м/с). В закрытом рабочем участке 4 прямоугольного поперечного сечения для испытаний устанавливаются обтекаемые тела: крыловые профили, пластины и т.д. Диффузор 9 преобразует кинетическую энергию выходящего из рабочего участка потока в энергию давления, уменьшая потери энергии в трубе. Для предотвращения отрыва потока в диффузоре по его длине установлены три сетки 7.

К рабочему участку и потоку в нём предъявляются следующие требования:

- 1. Однородность.
- 2. Малое изменение распределений скоростей и давлений по длине рабочего участка.
- 3. Низкая турбулентность набегающего потока.
- 4. Стационарность.
- 5. Границы рабочего участка не должны существенно влиять на обтекание тел, что требует применения рабочих участков, размеры которых велики по сравнению с размерами обтекаемых тел.



Рис. 1.1. Схема аэродинамической трубы (размеры в мм):

1-устройство визуализации потока; 2-сопло; 3-отверстие отбора статического давления Ø0,8 мм; 4-рабочий участок; 5-экспериментальный профиль; 6-микроманометр для измерения падения давления на сопле; 7-сетка; 8-барометр; 9-диффузор; 10-пускатель; 11-регулятор скорости потока; 12-вентилятор; 13-защитная решетка; 14-термометр

2. Измерение параметров потока и контрольно-измерительные приборы

При вычислении давлений в потоке сжимаемого воздуха с некоторой погрешностью можно пренебрегать изменением плотности и пользоваться уравнением Бернулли для несжимаемой жидкости. Погрешность уменьшается с уменьшением числа Маха $M=V_0/a$, представляющего собой отношение скорости жидкости V_0 к скорости звука *a*. При скорости $V_0=68$ м/с и *a*=340 м/с число M=0,2 и, как показывают расчеты, погрешности вычисления давлений и плотностей не превышают 1 и 2% соответственно. В данной аэродинамической трубе, где $V_0<40$ м/с, указанные погрешности будут еще меньшими.

<u>Температура воздуха</u> *t* в градусах Цельсия измеряется термометром *14*. Абсолютная температура в градусах Кельвина:

$$T = (273 + t) \text{ K}$$
 (1.1)

<u>Атмосферное давление</u> *p*_{ат} в Па определяется по барометру.

<u>Плотность</u> ρ в кг/м³ вычисляется по уравнению состояния идеальных газов

$$p=p/RT,$$
 (1.2)

где $p = p_{ar}$ – абсолютное давление воздуха, Па; R=287,14 Дж/кг·К– газовая постоянная воздуха. <u>Динамическая вязкость воздуха µ</u> при умеренных давлениях не зависит от давления и увеличивается с ростом температуры t. Эта зависимость показана на рис. 1.2. (Единицей динамической вязкости в системе СИ является 1 паскаль–секунда=1 кг/м·с=1 Па·с).

Избыточные давления или вакуумы измеряются чашечными микромано-



Рис. 1.2. Динамическая вязкость воздуха

метрами с наклонной трубкой (рис.1.3).

Избыточное давление или вакуум в Па равны:



Рис. 1.3. Чашечный микроманометр:

1-плита; 2-чашка; 3-корректор нуля; 4-уровень рабочей жидкости; 5-направляющая; 6-фиксатор наклона измерительной трубки; 7-измерительная трубка; 8-винты установки микроманометра по уровням;9-рукоятка переключения трехходового крана;10-винт корректора нуля; - подвод вакуума; + подвод избыточного давления; 0-контроль нуля микроманометра

$$p_{\mu} = -p_{B} = \rho_{p} g l K, \qquad (1.3)$$

где $K=\sin \alpha$ – постоянная микроманометра;

α- угол наклона трубки микроманометра к горизонту;

 $\rho_p = 790 \text{ кг/м}^3 - плотность рабочей жидкости микроманометра;$ g=9.81 м/c² – ускорение свободного падения;

l- отсчет по шкале микроманометра, м.

С уменьшением угла α точность измерения заданного давления возрастает, так как при этом увеличивается *l*.

Скорость набегающего потока V₀ в м/с в рабочем участке находим по падению давления на сопле. Составим уравнение Бернулли для двух точек линии тока, показанной на рис. 1.1. Одну точку выберем на удалении от сопла в помещении лаборатории, где давление равно атмосферному $p_{\rm at}$, а скорость равна нулю. Другую точку – на входе в рабочий участок, где давление p_0 , а скорость *V*₀. Уравнение Бернулли примет вид:

$$p_{\rm ar} = p_0 + \rho V_0^2/2 + \zeta \rho V_0^2/2,$$

где р– плотность воздуха;

ζ- коэффициент потерь энергии.

Из этого уравнения получаем

$$V_0 = \left(\frac{1}{\sqrt{1+\zeta}}\right) / \sqrt{2\Delta p_0 / \rho} ,$$

 $\Delta p_0 = p_{at} - p_0 -$ падение давления на сопле. Измерения показали, что с погде грешностью не более 0.5% можно принять $\zeta=0$. Так как в соответствии с (1.3) $\Delta p_0 = \rho_{\rm p} g l_0 K_0$, то

$$V_0 = \sqrt{\frac{2\rho_p g l_0 K_0}{\rho}} \tag{1.4}$$

И

$\rho V_0^2/2 = \rho_p g l_0 K_0$ (1.5)

3. Эксперимент и обработка результатов

- 1. Ознакомиться на месте с устройством аэродинамической трубы.
- 2. Импульсными трубками подключить микроманометры к отверстию 3 отбора статического давления и к отверстию на поверхности тела.
- 3. Установить микроманометры горизонтально по уровням и установить нули микроманометров.
- 4. Запустить трубу и поддерживая постоянную скорость в рабочем участке, записать в протокол №1 показания приборов и рассчитать величины, указанные в протоколе.

Отчет о лабораторной работе должен содержать схему аэродинамической трубы (рис. 1.1), перечень формул для расчета параметров потока, протокол №1.

Дословное переписывание инструкции не допускается!

4. Контрольные вопросы

1. Судно на подводных крыльях движется вдоль берега реки по течению со скоростью V₁=80 км/час, скорость воды в реке V₂=10 км/час. Какова скорость обращенного движения при испытаниях подводных крыльев в гидродинамической трубе?

- 2. Почему в рабочем участке стремятся получить однородное поле скоростей? Каково назначение сопла? Каким требованиям должен удовлетворять поток в рабочем участке?
- 3. Изобразить ход линий полной энергии и пьезометрической по длине аэродинамической трубы?
- 4. Конец измерительной трубки микроманометра, наклоненной под углом α=30°, подсоединен к отверстию отбора давления, чашка сообщена с атмосферой, плотность рабочей жидкости ρ_p=850 кг/м³. Отсчет по шкале микроманометра *l*=150 мм, показание барометра 102 кПа. Определить абсолютное давление в точке отбора давлений.
- 5. К чашке микроманометра подведено некоторое давление, конец измерительной трубки сообщен с атмосферой. Определить абсолютное давление, если все прочие значения – такие же, как в предыдущем вопросе.
- 6. При *К*=0.6 отсчет по шкале микроманометра *l*=100 мм. Как изменится *l*, если наклон трубки микроманометра увеличили и *K*=0.4.
- Микроманометр можно использовать в качестве дифференциального манометра для измерения разности давлений. Для этого необходимо повернуть рукоятку 9 (рис. 1.3) в положение + и подвести большее давление p₁ к ниппелю +, а меньшее давление p₂ к ниппелю -. Подсчитать разницу давлений p₂-p₁, если *l*=100 мм, *K*=0.8, ρ_p=790 кг/м³.
- 8. Микроманометром предполагается измерить избыточное давление *p_u*=1200 Па. Длина шкалы 300 мм, плотность рабочей жидкости *ρ_p*=790 кг/м³. Каково минимальное значение *K*? Что произойдет, если выбрать K=0.4?
- 9. Воспользоваться формулой (1.4) и составить таблицу зависимости скорости набегающего потока V_0 от показаний l_0 микроманометра сопла $V_0=f_1(l_0)$, а также таблицу зависимости динамического давления $\rho V_0^2/2=f_2(l_0)$ для указанных ниже значений постоянных.

Зависимость $V_0 = f_1(l_0)$ и $\rho V_0^2/2 = f_2(l_0)$ при $t = 20^{\circ}$ С, $p_{ar} = 100$ кПа, $K_0 = 0.4$, $\rho_p = 790$ кг/м³, g = 9.81 м/с.

| <i>l</i> ₀ , мм | 60 | 64 | 68 | 72 | 76 | 80 | 84 |
|-----------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| <i>V</i> ₀ , м/с | | | | | | | |
| $\rho V_0^2/2$, Па | | | | | | | |

10. В данной аэродинамической трубе испытывается крыловой профиль с хордой *L*. Число Рейнольдса подсчитывается по формуле Re=V₀Lρ/µ. Определить Re, если длина хорды *L*=50 мм, а показания приборов аэродинамической трубы: *t*=22°C, *p*_{at}=100 кПа, *l*₀=72 мм, *K*₀=0.4. Протокол №1 РАСЧЕТ ОПЫТНЫХ ВЕЛИЧИН

____20__ г. Студент гр. ГПА–____

(Ф.И.О., подпись)

| | Наименование величины | Размер- ность | Численное значение |
|-----------|---|-------------------|-----------------------|
| - | Температура воздуха t | °C | |
| ЭНТ | Атмосферное давление <i>p</i> ат | Па | |
| Экспериме | Отсчет по шкале микроманометра сопла l_0 | MM | |
| | Постоянная микроманометра К ₀ | _ | |
| | Отсчет по шкале микроманометра для из- мерения давления на поверхности тела <i>l</i> | MM | |
| | Постоянная микроманометра К | — | |
| | Абсолютная температура воздуха Т | К | |
| Расчет | Плотность воздуха р | кг/м ³ | |
| | Динамическая вязкость воздуха µ | кг/м·с | |
| | Скорость в рабочем участке V_0 | м/с | |

 $V_0 = \sqrt{2\rho_{\rm p}gl_0K_0/\rho} = \sqrt{-1}$

=

Лабораторная работа №2

Распределение давлений на круговом цилиндре

Цель работы – получить экспериментальное распределение давлений при поперечном обтекании кругового цилиндра однородным плоским потоком и сравнить это распределение с теоретическим.

1. Общие сведения

Круговой цилиндр является типичным представителем неудобообтекаемых тел, широко используемых в технике, к которым относятся провода линий электропередач, дымовые трубы, радиомачты, телевизионные башни, пучки труб в теплообменных аппаратах, артиллерийские снаряды, втулки рабочих колес турбомашин, лопатки турбомашин при больших углах атаки, судовые наклонные гребные валы, устои мостов и т.п. Для прочностных, тепловых, баллистических и других расчетов необходимы сведения об обтекании цилиндра.

При измерении параметров потока (скорости, её направления, давления и т.д.) в поток вводят различные тела небольших размеров – зонды (насадки). По значениям давлений и перепадов давлений на поверхности зонда можно рассчитать параметры потока. Одним из таких тел может быть цилиндр, который обтекается потоком, перпендикулярным его оси (поперечное обтекание). Чтобы правильно сконструировать цилиндрический зонд, также необходимо изучить поперечное обтекание цилиндра.

Известно, что вектор скорости при плоском обтекании цилиндра параллельноструйным потенциальным потоком направлен по касательной к поверхности, а его модуль в произвольной точке М равен

$$V=2V_0 |\sin \Theta|, \qquad (2.1)$$

где V_0 – скорость потока на бесконечности, Θ – угол, определяющий положение точки M (рис. 2.1,а). Для двух точек потенциального потока — в бесконечности и на цилиндре $p_0 + \rho V_0^2/2 = p + \rho V^2/2$. Следовательно безразмерный перепад давлений (коэффициент давления)

$$\overline{p} = \frac{p - p_0}{\rho V_0^2 / 2} = 1 - \left(V / V_0 \right)^2 = 1 - 4 \sin^2 \Theta.$$
(2.2)

Зависимость коэффициента давления от угла точки М на цилиндре по уравнению (2.2) показана на рис. 2.16 пунктирной линией.

Вязкость жидкости существенно меняет картину обтекания (рис. 2.2б) и распределение давлений (рис. 2.1б). Они зависят от числа Рейнольдса, которое при обтекании цилиндра подсчитывается как

$$\operatorname{Re} = \frac{V_0 \, d \, \rho}{\mu}.\tag{2.3}$$



Рис. 2.1. Обтекание цилиндра потенциальным потоком (*a*) и зависимости коэффициента давления от числа Рейнольдса (*б*)



Рис. 2.2. Фотографии обтекания цилиндра потенциальным потоком (*a*) и потоком вязкой жидкости (*б*)

2. Методика эксперимента и обработка результатов

Как показано на рис. 2.3, экспериментальный цилиндр 5 диаметром d=8 мм устанавливается в рабочий участок 3 аэродинамической трубы и простирается от одной торцовой стенки рабочего участка до другой, расстояние между которыми b=65,4 мм. Так как длина цилиндра намного превышает его диаметр (b/d=8,1), то течение вдали от торцовых стенок можно считать плоским. В середине длины цилиндра просверлено малое отверстие отбора статического давления диаметром 0,5 мм, которое соединяется с отверстием, расположенным на оси вращения цилиндра. Импульсной трубкой 7 давление подводится к микроманометру l.



Рис. 2.3. Схема измерений:

1-микроманометр для измерения давления на цилиндре; 2-микроманометр для измерения падения давления на сопле; 3-рабочий участок; 4-отверстие отбора статического давления; 5-экспериментальный цилиндр; 6-лимб; 7-импульсные трубки

Поворачивая цилиндр вокруг оси, меняем угловое положение отверстия отбора давления и получаем распределение давлений. Эксперимент проводится при постоянной скорости V_0 набегающего потока, которая вычисляется по по-казанию микроманометра 2.

По формуле (1.3) давление p_0 в набегающем потоке и давление p в точке цилиндра, расположенной под углом Θ к направлению $\vec{V_0}$ равны:

$$p_0 = p_{\rm at} - \rho_{\rm p} g \, l_0 K_0, \, p = p_{\rm at} - \rho_{\rm p} g \, l \, K,$$

где *K*⁰ и *К* — постоянные микроманометров.

Поэтому коэффициент давления

$$\overline{p} = \frac{p - p_0}{\rho V_0^2 / 2} = 1 - \frac{Kl}{K_0 l_0}.$$
(2.4)

Если измерительные трубки микроманометров наклонить под одинаковым углом, то $K_0 = K$ и формула (2.4) упрощается

$$\overline{p} = 1 - \frac{l}{l_0}.$$
(2.5)

Рекомендуется придерживаться следующей последовательности эксперимента.

- 1. Сообразуясь с ходом экспериментальной кривой при **Re**=1,0·10⁵ на рис. 2.1,б, назначить углы Θ расположения отверстия цилиндра. Общее число экспериментальных точек 15...20.
- 2. Установить цилиндр в рабочий участок и подключить микроманометры согласно рис. 2.3.

3. Включить аэродинамическую трубу и при V₀=const получить распределение давлений на цилиндре. Данные измерений занести в протокол №2.

По полученным данным построить экспериментальную кривую зависимости $\bar{p} = f(\Theta)$, а по формуле (2.2) – теоретическую кривую. Подсчитать число Рейнольдса. Сделать выводы о согласии теории с экспериментом, изобразить картины обтеканий цилиндра потенциальным потоком и потоком вязкой жидкости, а также указать возможные причины расхождения теории и эксперимента.

Отчет о лабораторной работе должен содержать расчетные формулы с пояснениями, схему измерений (рис. 2.3), протокол №2, кривые $\bar{p} = f(\Theta)$, картины обтекания цилиндра, давления и скорости в характерных точках A, B, M, S с изображением их на кривой $\bar{p} = f(\Theta)$.

3. Контрольные вопросы

- 1. Линия тока, поверхность тока, трубка тока. Траектория, линия отмеченных частиц.
- 2. Простейшие способы визуализации потоков.
- 3. Потенциальное и вихревое течение жидкости.
- 4. Какое течение называется плоским? Примеры плоских течений.
- 5. Интегралы уравнений потенциального и вихревого движения жидкости.
- 6. Доказать, что коэффициент давления $\bar{p} = \frac{p p_0}{\rho V_0^2 / 2}$ связан с относительной скоростью *V*/*V*₀ соотношением $\bar{p} = 1 (V/V_0)^2$
- 7. Каково значение скорости, если $\bar{p} = 1$, $\bar{p} = 0$, $\bar{p} = \bar{p}_{min}$, $\bar{p} = \bar{p}_{max}$?
- 8. Вывести формулу (2.2).
- 9. Описать методику эксперимента.
- 10. Чем объяснить разницу между экспериментальным и теоретическим распределением давлений?



Таблица характерных точек

| Точка | Θ° | Давление | Скорость |
|-------|----|----------------------|----------|
| A | | $p_0 + \rho V_0^2/2$ | |
| В | | p_0 | |
| М | | min | |
| S | | Отрыв і | тотока |

Картины обтекания цилиндра

Θ°

Теория



Эксперимент



Лабораторная работа №3

Насадки полного давления

Цель работы—тарировка насадков полного давления и определение допускаемых углов скоса потока.

1. Общие сведения

Для измерения осредненных по времени полей полных и статических давлений, а также величины и направления скорости потока газа или жидкости в различных трубопроводах, каналах и гидромашинах применяются специальные устройства, называемые *зондами* или *на*-

устроиства, называемые зоноами или насадками. Описание насадков на рис. 3.2, 3.3, 3.4 заимствованы из работы [5]. Насадки имеют малые геометрические размеры, что позволяет уменьшить возмущение потока, вызываемое приемной частью насадка, и получить значения интересующих исследователя параметров, приближающихся к локальным.

Насадок помещается в поток и измеряются давления в его приемных отверстиях. По значениям давлений рассчитываются параметры в данной точке потока. В зависимости от назначения на практике применяются самые различные насадки.

К насадкам для измерения давления, величины и направления скорости потока предъявляются следующие требования:

Минимальные габариты приемной части насадка при небольшой инерционности всей измерительной системы.

Максимальная нечувствительность к углам скоса потока (см. ниже).



Рис. 3.1. Углы скоса потока

Стабильность поправочных коэффициентов насадков в течение всего срока службы.

Минимальное расстояние от приемных отверстий насадка до его оси вращения.

Возможность проводить измерения в достаточной близости от стенок исследуемого канала.

Достаточная прочность.

Технологичность и простота изготовления.

2. Трубки полного давления

Насадки, служащие для измерения только полных давлений, называются насадками полного давления (НПД). На рис. 3.1 показан один из простейших насадков полного давления. Насадок ориентируется в потоке таким образом, чтобы направление оси приемного отверстия совпало с направлением вектора скорости V в данной точке потока. Для этого необходимо, чтобы угол δ в вертикальной и угол β в горизонтальной плоскостях на этом рисунке равнялись нулю. Эти углы называются *углами скоса потока*. На практике не удается установить насадок под нулевыми углами и возникает погрешность измерения полного давления.



Рис. 3.2. Различные формы головок Г-образных НПД: *а* — цилиндрическая; *б* — полусферическая; *в* — сферическая; *г* — коническая; *д* — цилиндрическая с зенковкой; *е* — эллиптическая

В общем случае полное давление можно измерить отбором давления из

Рис. 3.3. Цилиндрический НПД

критической точки (точки разветвления) на поверхности тела любой формы. Поэтому в исследовательской практике используются различные НПД. На рис. 3.2 изображены возможные формы приемной части Г-образных НПД. Теоретически и экспериментально подтверждено, что при дозвуковых скоростях течения поправочный коэффициент Г-образной НПД при нулевых углах скоса потока не зависит от формы головки диаметра приемного отверстия и расстояния от головки до державки. Это положение справедливо в том случае, если приемное отверстие НПД имеет форму окружности, лежащей в плоскости, перпендикулярной вектору скорости невозмущенного потока.

Чувствительность Г-образных НПД к углам скоса потока в значительной степени зависит от соотношения диаметров трубки и приемного отверстия. Для НПД с полусферической головкой (рис. 3.26) чувствительность к углу β увеличивается с ростом d_2/d_1 . Область нечувствительности

составляет $\pm (5-15)^{\circ}$. Выполнение Г-образных ТПД с 90-градусной фаской увеличило нечувствительность к углам β и δ до $\pm (18-20)^{\circ}$ во всей области исследованных отношений $l/d_1=2-9$.

Из известных типов НПД наиболее простым и технологичным является цилиндрический (рис. 3.3). Анализ результатов испытаний таких насадков показывает, что нечувствительность НПД к углу скоса потока β не зависит *l/d*₁, но



Рис. 3.4. НПД с протоком

с Г-образным ниппелем (*a*) и прямым ниппелем (*б*): *1* — державка; 2 — ниппель; 3 — экран

увеличивается с ростом d_2/d_1 и составляет ±(10–15)°. Нечувствительность к углу δ зависит от d_2/d_1 , не зависит от l/d_1 и составляет ±(2-6)° в диапазоне $d_2/d_1=0,4-0,7$.

Широкое распространение для измерения полных давлений получили НПД с протоком. Экран 3 направляет поток к приемным отверстиям. Поэтому эти НПД нечувствительны к большим углам скоса потока β и δ , которые достигают $\pm (40-50)^{\circ}$. Такие насадки с Г-образным и прямым ниппелями показаны на рис. 3.4.

Анализ имеющихся в литературе материалов и опыт работы на экспериментальных стендах показывает, что для измерения полных давлений в неподвижных элементах проточной части гидромашин целесообразно использовать следующие типы НПД.

При пространственном потоке с углами $\delta \le (35-45)^\circ$ следует применять НПД с протоком с прямым ниппелем (рис. 3.4*a*). Эти же НПД целесообразно использовать при измерениях и в практически плоском потоке, если нет возможности ориентировать трубки по углу β .

При пространственном потоке с $\delta \le 15^{\circ}$ целесообразно применять сравнительно простые Г-образные НПД с фаской (рис. 2 ∂). При практически плоском потоке с $\delta \le (4-6)^\circ$ следует использовать исключительно технологичные, малогабаритные и удобные для ввода в проточную часть цилиндрические НПД (рис. 3.3).

3. Координатники

Механизмы, предназначенные для перемещения и фиксации положения насадков, носят общее название *координатников*. Все существующие типы координатников можно разделить на две группы: координатники с дистанционным механическим или электрическим приводом и координатники с непосредственным ручным приводом. Первая группа координатников обеспечивает исследователю более безопасные условия работы. Однако сложность электрических и кинематических схем, относительная ненадежность, высокая стоимость и другие недостатки препятствуют их широкому распространению.

К координатникам с ручным приводом предъявляются следующие требования: безопасность в работе; надежность, удобство и простота в эксплуатации; малые вес и габаритные размеры; невысокая стоимость изготовления; поступа-



Рис. 3.5. Координатник

тельное перемещение подвижной части координатника на 70–80 мм; поворот подвижной части координатника на 360°; точность измерения поступательного перемещения не менее 0,1–0,3 мм, а точность измерения угла поворота не менее 0,3–0,5°, и др. требования.

На рис. 3.5 показан координатник конструкции Санкт-Петербургского Государственного политехнического университета, разновидность которого используется описываемых лабораторных работах. На корпусе *1* смонтированы все необходимые детали. Насадок *10* устанавливается и фиксируется в полом винте 7 при помощи шпонки *9*, припаянной к державке насадка, и стопорного винта *8*.

Поступательное перемещение винта 7 производится поворотом гайки 13. При этом винт удерживается от проворачивания шпонкой 12, входящей в паз винта, профрезерованный по всей длине последнего. Координатник вместе с насадком 10 и скобой 5 вращается вокруг оси поворотом барашка 6. При этом шестерня 2, закрепленная на оси барашка 6, обкатывается по зубчатому колесу 3, жестко связанному с неподвижным корпусом 1.

Насадок уплотняется резиновой манжеткой 18 с нажимной гайкой 19, установленными в ниппеле 17.

Корпус *1* координатника крепится на ниппеле *17* цанговым зажимом с гай-кой *16*.

Подвижная часть координатника совместно с насадком фиксируется в нужном положении стопорами 4 и 11. Поступательное перемещение насадка определяется по двусторонней шкале, имеющейся на винте 7. Двадцать сверлений на торце гайки 13 позволяют фиксировать стопором 11 перемещение насадка с точностью до 0,05 мм. Координатник снабжен уровнем 14, а также двумя сменными лимбами 15, служащими для отсчета углового перемещения насадка, и тремя взаимозаменяемыми винтами 7 с диаметрами внутреннего отверстия 3, 4 и 5 мм.

4. Методика эксперимента и обработка результатов

Как показано на рис. 3.6, тарируемый насадок полного давления устанавливается в рабочем участке аэродинамической трубы. Кроме того, в рабочем участке имеется эталон, представляющий собой трубку Пито-Прандля. Импульсными трубками статическое давление p_3 и полные давления p_3^* и p_T^* подводятся к микроманометрам. В обозначениях давлений э — эталонный насадок; т — тарируемый.

В процессе эксперимента тарируемый насадок устанавливается под углами β к продольной оси рабочего участка, которые рекомендованы преподавателем. Для каждого угла фиксируются показания обоих микроманометров l_3 и $\Delta l_{\rm T}$. Показания отсчитываются лишь после того, как установятся уровни жидкости в трубках микроманометров. Вследствие инерционности измерительной системы, особенно при углах близких к нулевым, не следует спешить с отсчетом по шкалам микроманометров.



Рис. 3.6. Схема подсоединения насадков

Тарировочный коэффициент насадка рассчитывается по следующей формуле

$$\xi^{*} = \frac{p_{\mathfrak{I}}^{*} - p_{\mathfrak{T}}^{*}}{\rho V_{0}^{2}/2} = \frac{\left(\rho_{p} \Delta l K\right)_{\mathfrak{T}}}{\left(\rho_{p} l K\right)_{\mathfrak{I}}}.$$
(3.1)

По полученным данным следует построить экспериментальные кривые зависимости $\xi^* = f(\beta)$ для каждого тарируемого насадка (рис. 7). (Данные по остальным насадкам берутся у других подгрупп.)

Из формулы (3.1) следует, что при известном по результатам тарировки ξ^* действительное полное давление в некоторой точке потока, скорость в котором равна V:

$$p^* = \rho_{\rm p} l K + \xi^* \frac{\rho V^2}{2}. \tag{3.2}$$

Однако НПД удобно пользоваться без введения каких-либо поправок в показания. Поэтому на рис. 3.7 следует выбрать допускаемую по мнению экспериментатора погрешность коэффициента ξ^* и пользоваться формулой (3.2), полагая второе слагаемое равным нулю. Обычно $\xi^* = (1-3)\% \approx 0$. Далее на рис. 3.7 для каждого из насадков определяется угол, в пределах которого насадок нечувствителен к скосу потока. На рисунке для примера отмечены значения, при которых одна из кривых пересекает границу 2% зоны нечувствительности. Кроме того, делается вывод, какой из насадков наиболее чувствителен к скосу потока, а какой наименее.



Рис. 3.7. Пример оформления результатов тарировки

5. Контрольные вопросы

- 1. Углы скоса потока.
- 2. Принцип действия и различные виды насадков полного давления.
- 3. Преимущества, недостатки и область применения насадков полного давления с протоков.
- 4. Типы насадков полного давления, применяемых для исследований гидромашин.
- 5. Устройство координатника по рис. 3.5.
- 6. Измерения полного давления и скорости потока трубкой Пито-Прандтля.
- 7. Выведите формулу (3.2).
- 8. Опишите методику тарировки насадков полного давления.
- 9. Почему насадок №2 обладает меньшей чувствительностью к скосу потока, чем насадок №4?
- 10. Каковы причины низкой чувствительности к скосу насадка №4?

_200_г. Студент гр. ____ Параметры потока: °C t =T=К β кг/м³ ρ= μ= кг/м•с Тарируемый Атмосф. давление: *p*_{ат}= Па насадок V_∞ Тарировочный коэффициент насадка **p**∞ $\xi^* = \frac{p_3^* - p_{_{\rm T}}^*}{\rho V_{\infty}^2 / 2} = \frac{(\rho_{\rm p} \Delta l K)_{_{\rm T}}}{(\rho_{\rm p} l K)_{_{3}}} = f(\beta)$ Эталон Константы микроманометров 2 $K_{\rm r}$ = , $\rho_{\rm pr}$ = кг/м³, 4/ Ď p_э



| № п/і | ⁰ β, п град | l _э , мм | $\Delta l_{	au}$, MM | ٤* | Головная часть насадков, (размеры в мм) | | | |
|----------|------------------------------------|------------------------|--------------------------|----|--|--|--|--|
| | НПД с цилиндрической головкой (№1) | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | d = 1.2 MAM | | | |
| 4 | | | | | $d_{1} = 1,2$ MM $d_{2} = 0.7$ MM | | | |
| 5 | ; | | | | l/d ₁ =5,3 | | | |
| 6 | ; | | | | | | | |
| 7 | , | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | |
| 9 |) | | | | | | | |
| 10 |) | | | | | | | |
| 11 | 1 | | | | | | | |
| 12 | 2 | | | | | | | |
| 13 | 3 | | | | | | | |
| 14 | 4 | | | | | | | |

Механика жидкости и газа. Лабораторная работа №3





<u>Выводы</u>



Лабораторная работа №4

Тарировка цилиндрического зонда

Цель работы – определение нулевого положения и тарировочных коэффициентов цилиндрического зонда.

1. Общие сведения

Для определения направления, скорости и полного давления плоских потоков применяются цилиндрические насадки (зонды). Они имеют малые размеры и простую конструкцию. Цилиндрический зонд представляет собой цилиндрическую трубку с тремя приёмными отверстиями, как показано на рис. 4.1. Боковые отверстия 1 и 3 расположены под углом θ_{12} и θ_{32} по отношению к центральному отверстию 2. С точностью до погрешностей изготовления эти углы равны друг другу.



Рис. 4.1. Цилиндрический зонд

Цилиндрический зонд помещается в поток жидкости так, чтобы ось вращения *O-O* располагалась перпендикулярно плоскости течения. Давления p_1 , p_2 и p_3 в соответствующих приёмных отверстиях по трубкам (на рисунке не показаны) подводятся к микроманометрам. Будем поворачивать зонд вокруг оси вращения, пока давления в боковых отверстиях не станут равными $p_1 = p_3$. В этом случае говорят, что зонд *ориентирован по потоку*, причём, с вышеупомянутой погрешностью ось центрального отверстия направлена вдоль вектора скорости потока V_0 в данной точке. Такому направлению соответствует начальный, или нулевой угол θ_0 , отсчитанный по лимбу зонда. Этот угол определяется при тарировке.

Чтобы определить направление вектора скорости в данной точке некоторого потока, нужно выбрать начало отсчёта углов, поместить в эту точку приёмные отверстия зонда, ориентировать последний по потоку и отсчитать по лимбу соответствующий угол θ . Действительное направление потока

$$\varepsilon = \theta - \theta_0 \tag{4.1}$$

Чтобы найти полное давление $p^* = p_0 + \rho V_0^2/2$ в некоторой точке потока, необходимо поместить в эту точку приёмные отверстия зонда, ориентировать его по потоку и измерить p_2 . При этом

$$p^* = p_2.$$
 (4.2)

В соответствии с уравнением (2.2) лабораторной работы №2 коэффициенты давления равны:

$$\frac{p_1 - p_0}{\rho V_0^2/2} = 1 - 4\sin^2\theta, \ \frac{p_3 - p_0}{\rho V_0^2/2} = 1 - 4\sin^2\theta, \ \frac{p_2 - p_0}{\rho V_0^2/2} = 1.$$

Так как обычно $\theta = \theta_{12} = \theta_{32} = 45^\circ$, то $\sin \theta = 1/\sqrt{2}$, и $p_2 - p_1 = 4(\rho V_0^2/2)\sin^2 \theta = 2(-1)^2/2$

 $=2(\rho V_0^2/2)$, а $p_3 - p_1 = 2(\rho V_0^2/2)$. Следовательно, скорость потока

$$V_0 = \xi_{21} \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}}$$
или $V_0 = \xi_{23} \sqrt{\frac{2(p_3 - p_1)}{\rho}},$ (4.3)

где

$$\xi_{21} = \xi_{23} = 1/\sqrt{2} = 0,707$$
. (4.4)

Вследствие отклонения формы зонда от правильной цилиндрической, невозможности выполнить боковые отверстия одинаковыми, расположить их точно под углами $\theta_{12} = \theta_{32} = 45^{\circ}$ и др. уравнение (4.2) следует заменить на:

$$p^* = p_2 + \xi^* \left(\rho V_0^2 / 2 \right), \tag{4.5}$$

где ξ^* – тарировочный коэффициент полного давления, близкий к нулю. По вышеупомянутым причинам $\xi_{21} \neq \xi_{23} \neq 1/\sqrt{2}$. Их значения также определяются тарировкой. При измерениях скорости потока она рассчитывается по формулам (4.3), в которые подставляются тарировочные ξ_{21} и ξ_{23} .

2. Методика эксперимента и обработка результатов

В рабочий участок устанавливается эталонная трубка Пито-Прандтля и тарируемый цилиндрический зонд (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Определение угла нулевого положения зонда

Определяются параметры потока T, ρ , μ , p_{ar} и измеряется l_{3} . Поворачивая зонд вокруг оси, измеряют θ , l_{1} и l_{3} . По уравнению

$$\overline{p}_{13} = \frac{p_1 - p_3}{\rho V_0^2 / 2} = \frac{K(l_1 - l_3)}{K_3 l_3} = f(\theta)$$
(4.6)

вычисляется коэффициент давления. Строится зависимость $\overline{p}_{13} = f(\theta)$ и определяется угол θ_0 нулевого положения зонда.

Для найденного нулевого положения зонда определяются тарировочные коэффициенты зонда, как показано на рис. 4.3.



Рис. 4.3. Определение тарировочных коэффициентов зонда

Последние рассчитываются по формулам

$$\xi_{21} = \frac{\rho V_0^2 / 2}{p_2 - p_1} = \frac{K_3 l_3}{K_{21} \Delta l_{21}}, \ \xi_{23} = \frac{\rho V_0^2 / 2}{p_2 - p_3} = \frac{K_3 l_3}{K_{23} \Delta l_{23}}, \ \xi^* = \frac{p_3^* - p_2}{\rho V_0^2 / 2} = \frac{K_3 l_3^* - K_2 l_2}{K_3 l_3}$$
(4.7).

Эксперимент повторяется несколько раз. В выводах записываются расчётные формулы для θ_0 , $\rho V_0^2/2$, V_0 и p^* (протокол №4).

Отчет о лабораторной работе должен содержать: рис. 4.1, описание методики проведения и обработки данных эксперимента, протоколы испытаний и выводы. Дословное переписывание или копирование (на ксероксе, сканере и т.п.) инструкции не допускается!

3. Контрольные вопросы

1. Устройство одноканального цилиндрического зонда.

2. Какие параметры потока можно измерить цилиндрическим зондом? Последовательность измерений.

3. Устройство трёхканального цилиндрического зонда. Последовательность измерений.

4. Вывести формулу (4.4).

5. Как найти угол нулевого положения зонда?

6. Как найти тарировочный коэффициент динамического давления?

7. Как найти тарировочный коэффициент полного давления?

8. Найти скорость потока, измеренную тарированным цилиндрическим зондом, если плотность рабочей жидкости микроманометра 790 кг/м³, отсчёт по шкале микроманометра $\Delta l_{23} = 150$ мм, коэффициент микроманометра 0,4, а температура и давление воздуха 25 °C и 100 кПа соответственно.

9. При значениях величин, указанных в п. 8, найти динамическое давление $\rho V_0^2/2$.

10. Найти избыточное над атмосферным полное давление, если показание микроманометра, присоединённого к отверстию 2, равно $l_2 = 50$ мм, коэффициент микроманометра *K*=0,2, скорость потока $V_0=15$ м/с, а плотность $\rho=1,116$ кг/м³, а коэффициент ξ^* найден при тарировке.



Нулевое положение зонда θ_o = град.





Тарировочный коэф. динам. давления: $\xi_{21} = \frac{\rho V_0^2/2}{\rho_2 - \rho_1} = \frac{l_3 K_9}{\Delta l_{21} K_{21}}, \xi_{23} = \frac{\rho V_0^2/2}{\rho_2 - \rho_3} = \frac{l_3 K_9}{\Delta l_{23} K_{23}}$ Тарировочный коэф. полного давления $\xi^* = \frac{\rho_3^* - \rho_2}{\rho V_0^2/2} = \frac{K_3 l_3^* - K_2 l_2}{K_3 l_3}$

| NN n/n | Lə MM | AL21 MM | AL23 MM | ₹21 | ξ ₂₃ |
|-----------|----------|------------|------------|-----|-----------------|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |
| 6 | | | | | |

Средние арифметические

 $\xi_{21} = , \xi_{23} =$

Среднее арифметическое

выводы.

Лабораторная работа № 5

Коэффициент сопротивления круглого цилиндра

Цель работы – определить коэффициент сопротивления давления круглого цилиндра.

1. Общие сведения

К элементам dl поверхности крыла со стороны набегающего потока приложены касательные τdl и нормальные pdl силы (рис. 5.1). Нормальные силы давления потока на поверхность крыла образуют в совокупности главный вектор сил давления. Его проекция на направление потока на бесконечности называется сопротивлением давления. Проекция главного вектора приложенных к крылу касательных сил на направление потока на бесконечности называется сопротивлением трения. Профильное сопротивление P_x крыла – это сумма сопротивлений трения и давления.

При безвихревом обтекании тела конечного размера безграничным потоком *идеальной* жидкости сопротивление давления а, следовательно, и профильное сопротивление равно нулю *(парадокс Даламбера)*.

Профильное сопротивление *P_x плохообтекаемого* тела, например цилиндра или шара (рис. 5.2), почти целиком определяется сопротивлением давления; сопротивление трения незначительно.





Рис. 5.1. Крыловой профиль

Рис. 5.2. Круглый цилиндр

Найдем коэффициент сопротивления давления круглого цилиндра

$$C_x = \frac{P_x}{(\rho V_0^2 / 2) \cdot 2R}.$$
 (5.1)

Распределение давлений *р* на поверхности цилиндра характеризуется коэффициентом давления

$$\overline{p} = \frac{p - p_0}{\rho V_0^2 / 2}.$$
(5.2)

Сопротивление давления

$$P_x = \int_{0}^{2\pi} (pRd\theta)\cos\theta = \int_{0}^{2\pi} pRd(\sin\theta).$$
 (5.3)

Так как $\int_{0}^{2\pi} p_0 Rd(\sin \theta) = 0$, то уравнение (5.3) можно записать как

$$P_{x} = \int_{0}^{2\pi} (p - p_{0}) Rd(\sin\theta) = \frac{\rho V_{0}^{2}}{2} R \int_{0}^{2\pi} \overline{p} d(\sin\theta).$$
(5.4)

Поэтому

$$C_x = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \overline{p} d(\sin\theta).$$
 (5.5)

Так как распределение давлений симметрично относительно оси *x*, то можно записать:

$$C_x = \int_0^{\pi} \overline{p} d(\sin \theta).$$
 (5.6)

Следовательно, коэффициент сопротивления давления численно равен площади под кривой $\overline{p} = f(\sin \theta)$.

При обтекании цилиндра потоком идеальной жидкости

$$\overline{p} = 1 - 4\sin^2\theta \tag{5.7}$$

и $C_x = \int_0^{\pi} (1 - 4\sin^2 \theta) d(\sin \theta) = \sin \theta \Big|_0^{\pi} - \frac{4}{3}\sin^3 \theta \Big|_0^{\pi} = 0$. То есть для частного случая

обтекания цилиндра имеет место парадокс Даламбера.

Как показала лабораторная работа №2, при обтекании цилиндра потоком вязкой жидкости распределение давлений иное, чем по уравнению (5.7). Поэтому для вязкой жидкости коэффициент $C_x > 0$. Коэффициент сопротивления зависит от числа Рейнольдса (рис. 5.3)



Рис. 5.3. Зависимость коэффициента сопротивления круглых цилиндров от числа Рейнольдса

2. Методика эксперимента и обработка результатов

Из уравнения (5.6) очевидно, что для экспериментального определения C_x необходимо построить кривую $\overline{p} = f(\sin \theta)$ и найти площадь под этой кривой с учетом знака (рис. 5.4). Найденный коэффициент сопротивления давления C_x сравнивается с коэффициентом профильного сопротивления C_{xp} по рис. 5.3.

Отчет о лабораторной работе должен содержать: рис. 5.2, вывод формулы (5.6), описание методики проведения и обработки данных эксперимента, протокол испытаний и выводы.

3. Контрольные вопросы

- 1. Какие течения называются плоскими?
- 2. Сопротивление давления, сопротивление трения и профильное сопротивление.
- 3. Соотношение между сопротивлением давления и трения для тонкого крылового профиля и плохообтекаемого тела.
- 4. Каково профильное сопротивление тела, обтекаемого потоком идеальной жидкости?
- 5. Чем объясняется резкое уменьшение коэффициента сопротивления цилиндра в диапазоне Re=(3—5)10⁶.
- 6. Изобразить схемы обтекания цилиндра при Re=3·10⁶ и Re=5·10⁶.
- 7. В чем состоит закон подобия для сопротивления цилиндра.
- 8. Вывести формулу (5.6).
- 9. Методика эксперимента и обработки данных.
- 10.Цилиндр диаметром 10 мм обтекается потоком воды, имеющей кинематическую вязкость 1 ССт. Скорость потока на бесконечности 10 м/с. Воспользоваться рис. 5.3 и найти коэффициент сопротивления и силу сопротивления, если длина цилиндра 100мм.

КОЭФФИЦИЕНТ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ Протокол №5 цилиндра <u>200</u> г. Студент гр.

(Ф.И.О., подпись)

Цилиндр диаметром d = 8 мм в потоке воздуха Скорость набегающего потока $V_0 =$ м/с Динамическая вязкость воздуха µ = Число Рейнольдса $\mathbf{Re} = V_0 d\rho/\mu =$

| №/№ п/п | θ, градус | \overline{p} | sin 0 | $\overline{P} \stackrel{1}{\underset{0.8}{\overset{-}{=}}}$ | | | Macı | штаб: | |
|------------|--------------|----------------|-------|---|------|--|-----------------|--------------------|---|
| 1 | | | | | | <u>+ </u> | (| $0,01 C_{\lambda}$ | R |
| 2 | | | | 0,6 — | | | | | |
| 3 | | | | 0.4 | | | | | _ |
| 4 | | | | 0,4 | | | | | |
| 5 | | | | 0,2 - | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | |
| 7 | | | | 0 | | | | | |
| 8 | | | | -0.2 | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | |
| 10 | | | | -0,4 | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | |
| 12 | | | | -0,6 | | | | | |
| 13 | | | | -0.8 | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | |
| 15 | | | | -1,0 | | | | | |
| 16 | | | | 1.0 | | | | | |
| 17 | | | | -1,2 | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | |
| 20 | | | | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | |
| 21 | | | | sin 0 | | | | | |
| | | | | Рис. 4. Зав | исим | ость | \mathcal{D} = | t (sin | θ |

Выводы.

1.

(Сравнить экспериментальный C_x с коэффициентом C_{xp})

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа: Учебное пособие для университетов и вузов. М.: Наука, 1987. 904 с.
- 2. *Седов Л.И*. Методы подобия и размерности в механике. 10-е изд., доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 432 с.
- 3. *Гидравлика*, гидромашины и гидроприводы: Учеб. для вузов / Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1987. — 424 с.
- 4. Попов Д.Н., Панаиотти С.С., Рябинин И.В. Гидромеханика: Учеб. для вузов / Под ред. Д.Н. Попова. 2-е изд., стереотип. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 384 с. (Сер. Механика в техническом университете; Т. 6)
- 5. Галеркин Ю.Б., Рекстин Ф.С. Методы исследования центробежных компрессорных машин. Л.: Машиностроение, 1969. 304 с.
- 6. Горлин С.М., Слезингер И.И. Аэромеханические измерения (методы и приборы). М.: Наука, 1964. 720 с.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СТЕНДЫ

Лабораторные работы по второй части курса «Механика жидкости и газа» выполняются на экспериментальной установке кафедры К2-КФ «Малая аэродинамическая труба». Установка размещается в корп. 4, ауд. 119.

оглавление

| Лаб | ораторная работа №1 | 3 |
|-----|--|-----|
| | 1. Назначение и устройство аэродинамической трубы | |
| | 2. Измерение параметров потока и контрольно-измеритель | ные |
| | приборы | 4 |
| - | 3. Эксперимент и обработка результатов | 6 |
| 4 | 4. Контрольные вопросы | 6 |
| Лаб | ораторная работа №2 | 9 |
| | 1. Общие сведения | |
| | 2. Методика эксперимента и обработка результатов | |
| - | 3. Контрольные вопросы | |
| Лаб | бораторная работа №3 | 14 |
| | Насадки полного давления | 11 |
| _ | 1 Общие сведения | 11 |
| - | 2. Трубки полного давления | 15 |
| _ | 3. Координатники | |
| 2 | 4. Методика эксперимента и обработка результатов | |
| | 5. Контрольные вопросы | |
| Лаб | ораторная работа №4 | |
| | 1. Общие сведения | |
| | 2. Методика эксперимента и обработка результатов | |
| - | 3. Контрольные вопросы | |
| Лаб | ораторная работа № 5 | |
| | 1. Общие сведения | |
| | 2. Методика эксперимента и обработка результатов | |
| - | 3. Контрольные вопросы | |
| СПИ | СОК ЛИТЕРАТУРЫ | |
| ИСП | ОЛЬЗУЕМЫЕ СТЕНДЫ | |

Сергей Семенович Панаиотти Александр Иванович Савельев Александр Николаевич Сизов

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО КУРСУ «МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА»

Методические указания

Компьтерная верстка Савельева А.И.

Изд. лиц. №020523 от 25.04.97. Подписано в печать 27.04.04. Формат 60×84/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печ. л. 1,25. Усл. п. л. 1,1. Тираж 50 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета в КФ ММГТУ им. Н.Э. Баумана 248600, Калуга, ул. Циолковского, д.25, тел 77-45-02