



«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра автоматизации технологических процессов и производств

Допущены

к проведению занятий в 2018-2019 уч.году
Заведующий кафедрой

В.Ю. Бажин

«31» 10 2018 г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

для проведения лабораторных занятий по учебной дисциплине

«ГИДРОАЭРОМЕХАНИКА И ТЕПЛОМАССОБМЕН»

Специальность (направление подготовки): 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»

Профиль программы:

«Автоматизация технологических процессов и производств в нефтегазопереработке»

Разработал: доцент *Иванов П.В.*

*Обсуждена и одобрена на заседании кафедры
Протокол № 1 от 19 января 2018 г.*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2018**

Список условных обозначений

H – полный весовой напор
 h' – объемный напор,
 h – весовой напор
 $h_{\text{геод}}$ – геодезический напор
 $h_{\text{пьез}}$ – пьезометрический напор
 $h_{\text{дин}}$ – динамический напор
 $h_{\text{пот}}$ – потерянный напор (потери напора)
 $h_{\text{тр}}$ – потери напора на трение,
 $h_{\text{м}}$ – местные потери напора,
 z – высота подъема жидкости над плоскостью сравнения
 \mathcal{E} – механическая энергия
 γ – удельный вес
 W – средняя скорость потока жидкости в данном сечении
 F – площадь сечения потока жидкости
 Q – объемный расход
 M – массовый расход
 G – весовой расход
 ρ – плотность
 λ – коэффициент гидравлического трения
 Re – критерий Рейнольдса
 ξ – коэффициент местного сопротивления
 b – сопротивление трубопровода

Лабораторная работа №1 Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса

Цель работы

Измерение величины коэффициента вязкости силиконового масла.

Общие сведения

Вязкость – свойство жидкости оказывать сопротивление относительно движению (сдвигу) частиц жидкости. Это свойство обусловлено возникновением в движущейся жидкости сил трения, ибо они проявляются только при ее движении благодаря наличию сил сцепления между молекулами. Вязкость жидкости резко уменьшается с повышением температуры.

Характеристиками вязкости являются: динамический коэффициент вязкости μ и кинематический коэффициент вязкости γ .

Единицей динамического коэффициента вязкости в системе СГС является пуаз (П): $1 \text{ П} = 1 \text{ дин} \cdot \text{с} / \text{см}^2 = 1 \text{ г} / (\text{см} \cdot \text{с})$. Сотая доля пуаза носит название сантипуаз (сП): $1 \text{ сП} = 0,01 \text{ П}$. В системе МКГСС единицей динамического коэффициента вязкости является $\text{кгс} \cdot \text{с} / \text{м}^2$; в системе СИ – $\text{Па} \cdot \text{с}$. Связь между единицами следующая:

$$1 \text{ П} = 0,010193 \text{ кгс} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$1 \text{ кгс} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = 98,1 \text{ П} = 9,81 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Кинематический коэффициент вязкости:

$$\gamma = \mu / \rho$$

Единицей кинематического коэффициента вязкости в системе СГС является стокс (Ст), или $1 \text{ см}^2 / \text{с}$, а также сантистокс (сСт): $1 \text{ сСт} = 0,01 \text{ Ст}$. В системах МКГСС и СИ единицей кинематического коэффициента вязкости является $\text{м}^2 / \text{с}$: $1 \text{ м}^2 / \text{с} = 10^2 \text{ Ст}$.

Сила внутреннего трения возникает не только при движении жидкости относительно покоящегося тела, но и при движении твердого тела в покоящейся жидкости. На этом и основан метод измерения вязкости по Стоксу.

Суть метода состоит в том, что на всякое тело, движущееся в жидкости, действует сила сопротивления F , зависящая от многих факторов (формы тела, условий течения и т.д.), в том числе и от вязкости жидкости.

Стоксом была выведена формула для силы сопротивления, действующей на шарик, движущийся в жидкости, при условии, что движение жидкости относительно шарика ламинарное. Такое условие практически выполняется при достаточно малых скоростях движения шарика.

Формула Стокса имеет вид

$$F = 6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot r \cdot u \quad (1.1)$$

где μ - вязкость жидкости; r - радиус шарика; u - скорость шарика.

Прямая пропорциональность между силой и скоростью, которая предполагается в формуле (1.1), имеет место не для всех жидкостей (среды которые называют ньютоновскими). Для неньютоновских жидкостей коэффициент вязкости сам зависит от скорости; примерами таких жидкостей является кровь (содержащая взвешенные частицы) и другие суспензии.

Для оценки ламинарности, а следовательно и применимости формулы Стокса существует так называемое число, или критерий Рейнольдса, (Re):

$$Re = \rho \cdot u \cdot d / \mu \quad (1.2)$$

где d – характерный размер (в нашем случае диаметр шарика); ρ – плотность жидкости.

Для каждого вида движения жидкости существует такое критическое значение $Re_{кр}$, при $Re < Re_{кр}$ возможно только ламинарное течение. В частности, в нашем случае следует знать, что закон Стокса выполняется вплоть до значений числа Рейнольдса порядка 0,1. При Re около 1 сила сопротивления, определенная по закону Стокса, примерно на 10% ниже истинной. Поэтому для движущихся в жидкости шариков будем считать $Re_{кр} = 1$.

Метод определения вязкости жидкости (метод Стокса) состоит в наблюдении падения шарика в жидкости. В этом случае на шарик, кроме силы вязкости, определяемой формулой (1.1) и направленной вверх, действует сила Архимеда

$$F_A = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g \quad (1.3)$$

тоже направленная вверх, и сила тяжести

$$F_g = mg = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot \rho_o \cdot g \quad (1.4)$$

направленная вниз. Здесь ρ_o - плотность вещества шарика, g - ускорение свободного падения.

Так как сила вязкости F зависит от скорости движения шарика (две другие силы от скорости не зависят). То при падении шарика с ускорением она растет и поэтому вместе с силой Архимеда, в конце концов, должна уравновесить силу тяжести. После этого шарик падает с постоянной скоростью установившегося движения. При таком движении, следовательно, результирующая сила равна нулю, т.е. имеет место равенство

$$F_g = F + F_A \quad (1.5)$$

или

$$\frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot \rho_o \cdot g = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g + 6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot r \cdot u \quad (1.6)$$

тогда

$$\frac{2}{3} r^2 (\rho_o - \rho) g = 3 \mu \cdot u \quad (1.7)$$

Из равенства (1.7) получаем выражение для μ :

$$\mu = \frac{\frac{2}{9} r^2 (\rho_o - \rho) g}{u} \quad (1.8)$$

это и есть расчетная формула в методе Стокса. Формула справедлива для случая, когда шарик падает в среде, простирающейся безгранично по всем направлениям. Достичь этого в лаборатории практически невозможно, поэтому приходится учитывать размеры сосуда, в который падает шарик.

Если шарик падает вдоль цилиндрического сосуда радиусом R , то формула (1.8) преобразуется к виду

$$\mu = \frac{\frac{2}{9} r^2 (\rho_0 - \rho) g}{\left(1 + 2,1 \frac{r}{R}\right) u} \quad (1.9)$$

В лабораторной установке $r \ll R$, поэтому в качестве расчетной можно пользоваться формулой (1.8).

Описание экспериментальной установки

Для опыта используется стеклянный цилиндр, в который налита исследуемая жидкость.

На цилиндре имеются две метки М1 и М2. Метка М1 помещена на несколько сантиметров ниже уровня жидкости, чтобы к моменту, когда шарик проходит мимо нее, его движение уже было установившемся. Над цилиндром расположена воронка, в которую опускается шарик,двигающийся в дальнейшем примерно по оси цилиндра так, чтобы на его движение не влияли стенки.

Для проведения опыта отобраны 5-7 шариков разного размера.

Время t прохождения шарика от одной метки до другой измеряется секундомером. Расстояние l между метками М1 и М2 измеряется линейкой. Таким образом, скорость шарика $u=l/t$.

Порядок выполнения

1. Измерить диаметр шарика при помощи микрометра.
2. Бросить его в воронку. Когда шарик окажется на уровне верхней метки М1, запустить секундомер.
3. После прохождения шариком нижней отметки М2 остановить секундомер. Записать результат измерения в таблицу.
4. Повторить пункты 1-3, произведя измерения с несколькими шариками разных размеров (5-7) раз.
5. По формуле (1.8) вычислить μ , затем вычислить среднее значение. Результаты измерений, для которых $Re \geq 1$, при вычислениях среднего значения учитывать не следует.
6. Вычислить среднеквадратичную погрешность $\Delta\mu$:

$$\Delta\mu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i - \bar{\mu})^2}{n(n-1)}} \quad (1.10)$$

где n - число измерений с данной жидкостью.

7. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

№ п/п	r , м	t , с	l , м	u , м/с	μ , кг/(м·с)	$\Delta \mu$, кг/(м·с)	Re	Прим.

Контрольные вопросы

1. Что такое внутреннее трение?
2. Каков физический смысл коэффициента вязкости и его размерность?
3. Что такое критерий Re и зачем он нужен?
4. Какие силы действуют на шарик при его движении в жидкости?
5. Почему путь, проходимый шариком, отсчитывают не от поверхности жидкости?
6. Зависит ли коэффициент вязкости жидкости от температуры?
7. Какие факторы влияют на скорость шарика?
8. Как по-вашему выгоднее (с физической точки зрения) транспортировать жидкость по трубопроводу - в горячем или холодном состоянии?

Лабораторная работа №2

Изучение гидростатического давления

Цель работы

Закрепление знаний по разделу "Гидростатика", приобретение навыков измерения гидростатического давления жидкостными приборами.

Общие сведения

Абсолютное давление p представляет собой нормальное сжимающее напряжение в жидкости. В любой точке покоящейся жидкости оно может быть определено по основному уравнению гидростатики:

$$p = p_0 + \rho gh \quad (2.1)$$

где p_0 – абсолютное давление на свободной поверхности жидкости; ρ – плотность жидкости; h – глубина погружения точки под свободной поверхностью.

Если за начало отсчета принята величина атмосферного давления p_a , то избыточным (манометрическим) давлением называется разность:

$$p_u = p - p_a \quad (2.2)$$

Если атмосферное давление превышает абсолютное в некоторой точке, то разность между ними называется вакуумметрическим давлением (разрежением):

$$p_v = p_a - p \quad (2.3)$$

Атмосферное, избыточное и вакуумметрическое давления измеряют соответственно барометрами, манометрами и вакуумметрами. Разность давлений в двух точках измеряют дифференциальными манометрами. По принципу действия эти приборы подразделяют на жидкостные, механические и электрические.

Жидкостные приборы исторически стали применяться первыми, Их действие основано на уравнении (2.2). При этом величина давления может быть выражена как через единицы давления (1 Па = 1 Н/м²), так и в единицах, характеризующих высоту столба жидкости h (м вод.ст., мм рт.ст.). Преимуществами жидкостных приборов являются простота конструкции, надежность и высокая точность, они удобны при измерении небольших давлений.

Уравнение состояния идеального газа:

$$pV = \frac{m}{M} R_m T \quad (2.4)$$

где $R_m = 8,314$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; V – объем занимаемый газом, м³; p – давление газа, Па; T – температура газа, К; M – молярная масса газа, кг/моль; m – масса газа, кг.

Описание лабораторной установки

Лабораторный стенд состоит из резервуаров 1 и 2 частично заполненных жидкостью, соединенных между собой трубой с компрессором К1, который может нагнетать воздух из резервуара 1 в резервуар 2.

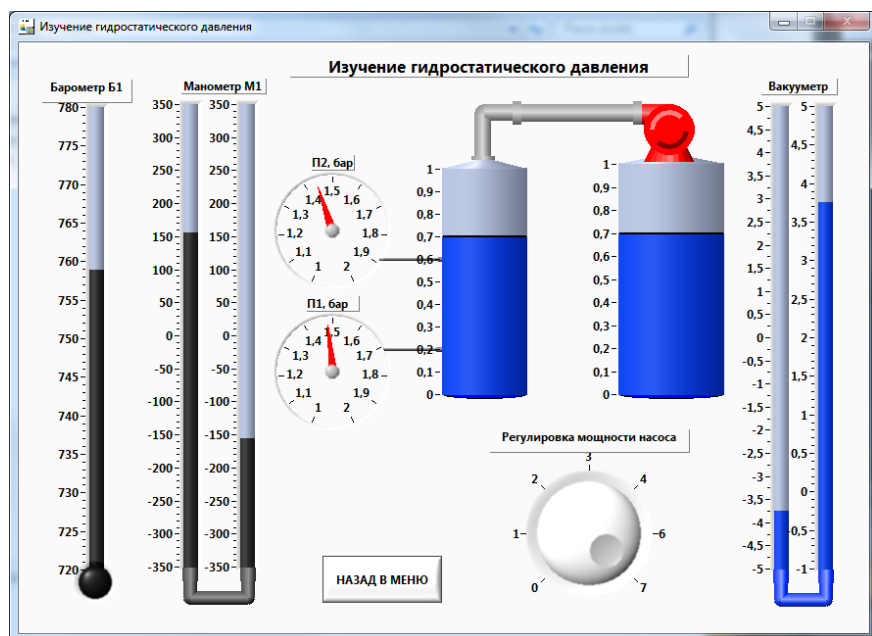


Рис. 2.1 Внешний вид лабораторного стенда

Для измерения давления над жидкостью в резервуаре 1 используется ртутный манометр М1. Пьезометры П1 и П2 служат для определения абсолютного гидростатического давления в соответствующих точках по высоте резервуара 1. Вакуумметр В1 служит для измерения вакуума над жидкостью в резервуаре 2.

Для измерения атмосферного давления используется ртутный барометр Б1.

Порядок выполнения

1. В резервуаре 1 над жидкостью с помощью компрессора К1 создать давление p_0 выше атмосферного p_a .
2. Измерить атмосферное давление барометром Б1.
3. Снять показания с манометра М1 и вакуумметра В1.
4. Снять показания с пьезометров П1 и П2, замерить высоту на которой они установлены.
5. Результаты измерений оформить в виде таблицы.

Таблица 2.1

Б1, мм рт.ст	П1, бар	П2, бар	В1, м вод.ст.

Обработка результатов опыта

1. Перевести все замеренные величины в систему СИ.
2. Определить абсолютное давление над жидкостью в резервуаре 1.
3. Определить плотность жидкости в резервуаре 1.
4. Определить абсолютное давление в резервуаре 2.
5. Определить массу воздуха перекачанного компрессором из резервуара 1 в резервуар 2.

Отчет по работе должен включать следующие пункты

1. Титульный лист.
2. Наименование и цель работы.
3. Схему опытной установки.
4. Таблицу наблюдений.
5. Обработку результатов опыта.
6. Выводы.

Лабораторная работа №3 Построение диаграммы напоров

Ц е л ь р а б о т ы

Изучение напоров движущейся жидкости и построение диаграммы уравнения Бернулли для установившегося напорного движения жидкости

О б щ и е с в е д е н и я

Движение жидкости по трубам и каналам происходит за счет разности напоров в начале и конце участка трубы (канала).

Под напором в гидроаэромеханике подразумевается удельная механическая энергия жидкости или газа, то есть энергия отнесенная к единице веса или объема движущейся среды. Энергия, отнесенная к единице веса, называется весовым напором и имеет размерность длины (м), если же рассматривают энергию единицы объема жидкости, то эту величину называют объемным напором, в этом случае удельная энергия измеряется в единицах давления (Па).

Между весовым и объемным напорами наблюдается простое соотношение

$$h' = \frac{\vartheta}{V} = \frac{\vartheta \gamma}{G} = h \cdot \gamma \quad (3.1)$$

Механическая энергия жидкости может иметь различную природу. Чаще всего в общем запасе энергии разделяют потенциальную и кинетическую составляющие.

Для жидкости или газа рассматривают два вида потенциальной энергии – это потенциальная энергия положения и потенциальная энергия давления.

Потенциальная энергия положения вызвана наличием силы тяжести и характеризует высоту жидкости над некоторой плоскостью сравнения.

Удельная потенциальная энергия положения называется геодезическим напором. Обозначается $h_{\text{геод}}$

Геодезический весовой напор равен высоте положения жидкости над плоскостью сравнения

$$h_{\text{геод}} = z; \quad (3.2)$$

Соответственно, объемный геодезический напор равен

$$h'_{\text{геод}} = z \cdot \gamma \quad (3.3)$$

Напор, соответствующий потенциальной энергии давления, называется пьезометрическим и рассчитывается по формулам:

$$h_{\text{пьез}} = \frac{p}{\gamma} \quad (3.4)$$

$$h'_{\text{пьез}} = p \quad (3.5)$$

Общий запас потенциальной энергии жидкости или газа определяется суммой геодезического и пьезометрического напоров, т.е. статическим напором

$$h_{\text{ст}} = h_{\text{геод}} + h_{\text{пьез}} = z + \frac{p}{\gamma} \quad (3.6)$$

$$h'_{\text{ст}} = h'_{\text{геод}} + h'_{\text{пьез}} = z\gamma + p \quad (3.7)$$

Движущиеся жидкость или газ, наряду с потенциальной, всегда обладают кинетической энергией. Соответствующий ей напор носит название динамического, или скоростного напора $h_{\text{дин}}$.

Поскольку кинетическая энергия выражается формулой $\mathcal{E}_k = \frac{mW^2}{2}$, то

$$h_{\text{дин}} = \frac{mW^2}{2G} = \frac{mW^2}{2mg} = \frac{W^2}{2g} \quad (3.8)$$

Объемный динамический напор (динамическое давление):

$$h'_{\text{дин}} = \gamma h_{\text{дин}} = \frac{W^2}{2g} \gamma = \frac{W^2}{2} \rho \quad (3.9)$$

Полная механическая энергия жидкости в данном сечении, т.е. полный, или гидродинамический напор, определяется суммой статического и динамического напоров:

$$H = h_{\text{геод}} + h_{\text{пьез}} + h_{\text{дин}} = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{W^2}{2g} \quad (3.10)$$

$$H' = h'_{\text{геод}} + h'_{\text{пьез}} + h'_{\text{дин}} = z\gamma + p + \frac{W^2}{2g} \gamma$$

Так как, по общему закону сохранения механической энергии, общий запас энергии жидкости во всех сечениях остается неизменным, для несжимаемой жидкости можно записать

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{W_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{W_2^2}{2g} + h_{\text{пот1-2}} \quad (3.11)$$

Это уравнение называется уравнением Бернулли - уравнение постоянства удельной механической энергии установившегося движения несжимаемой жидкости по живым сечениям потока.

$h_{\text{пот}}$ – это затраты энергии на преодоление сопротивления движению жидкости между двумя сечениями (потерянный напор)

Потери напора при движении жидкостей и газов $h_{\text{пот}}$ подразделяется на два вида:

– потери напора на трение, $h_{\text{тр}}$

– местные потери напора, $h_{\text{м}}$

Первые называются ещё потерями напора по длине, вторые – потерями напора на местных сопротивлениях.

Для проведения гидравлических расчетов, уравнение Бернулли дополняют уравнением неразрывности – сплошности, выражающим общий закон сохранения материи для движущейся жидкости или газа.

Для несжимаемой жидкости уравнение неразрывности записывается в виде равенства объемных расходов $Q = WF$ во всех живых сечениях потока.

$$W_1 F_1 = W_2 F_2 = \dots = W_n F_n \quad (3.12)$$

Для сжимаемой жидкости – в виде равенства массовых $M = \rho WF$ или весовых $G = \gamma WF$ расходов:

$$\rho_1 W_1 F_1 = \rho_2 W_2 F_2 = \dots = \rho_n W_n F_n \quad (3.13)$$

$$\gamma_1 W_1 F = \gamma_2 W_2 F_2 = \dots = \gamma_n W_n F_n \quad (3.14)$$

Динамика изменения напоров по сечениям движущейся жидкости может быть наглядно представлена с помощью диаграммы напоров. По оси X диаграммы откладываются расстояния между интересующими в данный момент сечениями, по оси Y - напоры в каждом сечении в каком либо масштабе. Сумма всех трех напоров в каждом сечении дает значение полного напора. На рис. представлен простейший случай диаграмм напоров для прямого участка горизонтальной трубы равного сечения. Линия $B-B'$ на диаграмме характеризует изменение высот z между двумя сечениями и называется геодезической линией. Линия $C-C'$ называется пьезометрической линией, определяется статическим напором. Область между геодезической и пьезометрической линиями характеризует изменение пьезометрического напора между сечениями. Линия $D-D'$ называется напорной или гидродинамической линией, определяется суммой всех трех напоров в каждом сечении. Область между линиями $C-C'$ и $D-D'$ характеризует изменение динамического напора по длине. Область между линиями $D-D'$ и $D-E$ показывает увеличение потерь напора по длине участка трубопровода.

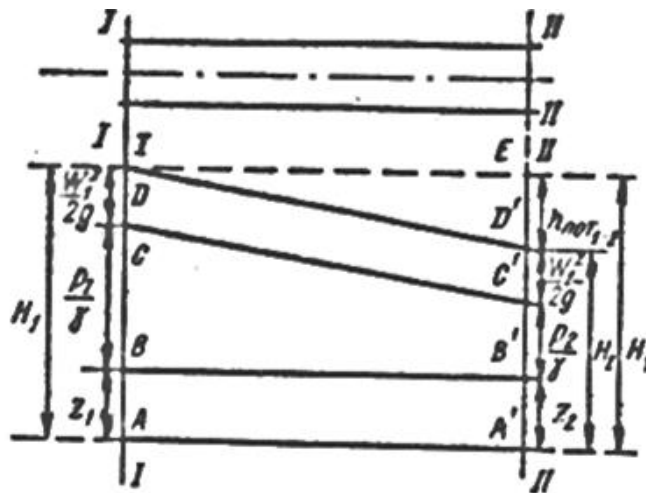


Рис. 3.1 Пример диаграммы напора для прямого участка горизонтальной трубы равного сечения

Описание экспериментальной установки

Лабораторный стенд состоит из трубопровода, составленного из последовательно соединенных труб различного сечения, колен и отводов разных углов. Расход жидкости в трубопроводе регулируется ручкой изменения расхода. По длине трубопровода установлены пьезометрические трубки для измерения пьезометрических напоров в различных сечениях.

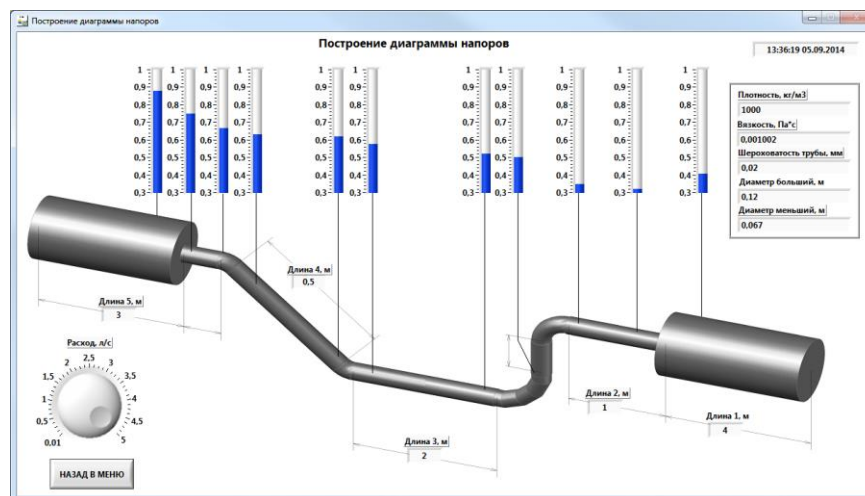


Рис. 3.2 Внешний вид лабораторного стенда

П о р я д о к в ы п о л н е н и я

1. Измерить пьезометрические напоры по пьезометрам
2. Определить динамический напор
3. Результаты измерений оформить в виде таблицы
4. Построить диаграмму напоров

Лабораторная работа №4 Измерение скорости и расхода жидкостей

Ц е л ь р а б о т ы

Ознакомится с принципом действия и устройством приборов для измерения скорости и расхода газов.

О б щ и е с в е д е н и я

1. Т р у б к а П и т о - П р а н д т л я

Для замера скоростей потока пользуются напорными трубками Пито - Прандтля. Напорная трубка состоит из двух трубок — внутренней и наружной. Внутренняя трубка, открытая с торца навстречу потоку, воспринимает общее давление, равное сумме статического и скоростного (динамического) давлений. Наружная трубка, имеющая круговую прорезь на боковой поверхности, воспринимает только статическое давление (статический напор). Напорная трубка всегда устанавливается вдоль оси трубопровода, открытым концом навстречу потоку. По разности общего и статического давлений (напора) можно определить скоростное (динамическое) давление (динамический напор).

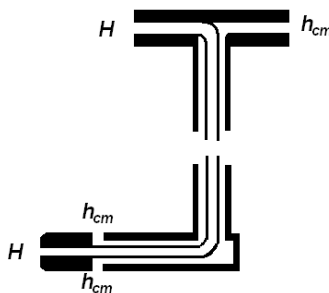


Рис. 4.1 Трубка Пито-Прандтля

Полный напор:

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{u}{2g} \quad (4.1)$$

Статический напор:

$$h_{ст} = z + \frac{p}{\gamma} = h_{теод} + h_{пъез} \quad (4.2)$$

Динамический напор:

$$h_{дин} = \frac{u}{2g} \quad (4.3)$$

Для измерения разности давлений концы трубок присоединяют к дифференциальному манометру, показывающему значение скоростного давления (напора).

$$h_{дин} = H - h_{ст} \quad (4.4)$$

Местная скорость:

$$u = \sqrt{2gh_{дин}} \quad (4.5)$$

Измеренное значение $h_{дин}$ и вычисленная отсюда скорость относятся только к точке замера.

Поперечное сечение трубопровода условно делится на ряд равновеликих кольцевых площадок I, II, III. Если произвести замеры местных скоростей в точках 1, 2, 3, то получатся средние скорости потока для

каждой кольцевой площадки. А так как все кольцевые площадки по условию равновелики, то средняя арифметическая величина из замеренных в точках 1, 2, 3 скоростей и будет являться средней скоростью данного потока.

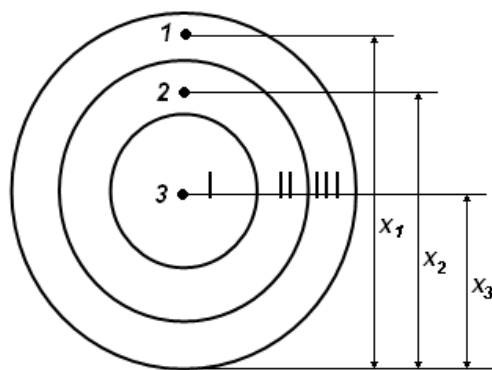


Рис. 4.2 Кольцевые площадки и точки замера скорости по сечению.

Если полученные в результате этих измерений значения местных скоростей отложить в масштабе на эскизе продольного разреза трубопровода в точках, соответствующих точкам замеров, и соединить концы векторов скоростей плавной кривой, то получим так называемый профиль или эпюру скоростей в трубопроводе.

Расстояния x от стенок трубопровода до средних точек каждой кольцевой площадки, т. е. до точек замера скоростей 1, 2, 3, определяют по следующей формуле

$$x = \frac{d}{2} \left(1 \pm \sqrt{\frac{2n-1}{2N}} \right) \quad (4.6)$$

где d — диаметр трубопровода;

n — номера окружностей, делящих пополам кольцевые площадки (считая от центра трубопровода);

N — число кольцевых площадок.

Знак минус в формуле берется при определении значений x лежащих ниже оси трубопровода, знак плюс — выше.

Средняя скорость потока может быть определена по максимальной скорости, которая наблюдается на оси потока. Вид формулы для расчета средней скорости зависит от режима движения жидкости.

При ламинарном режиме

$$W = 0,5 \cdot u_{max} \quad (4.7)$$

Для турбулентного режима

$$W = \frac{Re^{1/38}}{1,64} \cdot u_{max} \quad (4.8)$$

2. Р а с х о д о м е р В е н т у р и

Принцип действия расходомера Вентури основан на измерении разности давлений в различных по площади живых сечениях потока.

Этот метод измерения расхода широко используется при транспортировке газов по трубопроводам.

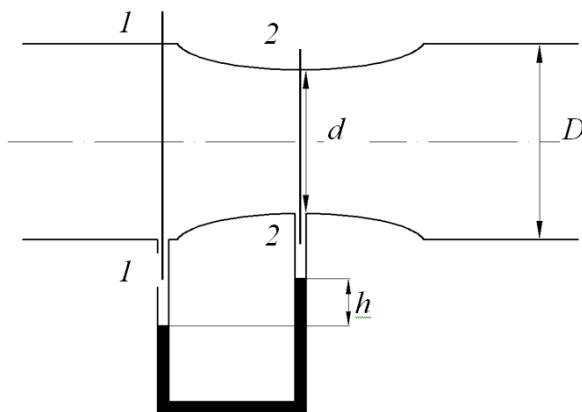


Рис.4.3 Расходомер Вентури.

Проведем живые сечения 1-1 и 2-2 и запишем для них уравнения неразрывности и Бернулли:

$$W_1 F_1 = W_2 F_2 \quad (4.9)$$

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{W_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{W_2^2}{2g} + h_{1-2} \quad (4.10)$$

Т.к. труба горизонтальная

$$z_1 = z_2$$

Пренебрегая потерями и выражая по уравнению неразрывности скорость во втором сечении через скорость в первом сечении, получим

$$\left(\frac{F_1^2}{F_2^2} - 1 \right) \frac{W_1^2}{2g} = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} \quad (4.11)$$

Откуда

$$W_1 = \sqrt{\frac{2g(p_1 - p_2)}{\gamma \left(\frac{F_1^2}{F_2^2} - 1 \right)}} = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left(\frac{F_1^2}{F_2^2} - 1 \right)}} \quad (4.12)$$

Разность давлений измеренная дифманометром:

$$p_1 - p_2 = (\rho_1 - \rho)gh \quad (4.13)$$

Где ρ_1 - плотность жидкости в манометре,

ρ - плотность жидкости в трубе,

h - разность уровней жидкости в дифманометре.

Расход в жидкости в трубе:

$$Q = F_1 W_1 = F_1 \sqrt{\frac{2g(p_1 - p_2)}{\gamma \left(\frac{F_1^2}{F_2^2} - 1 \right)}} = F_1 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left(\frac{F_1^2}{F_2^2} - 1 \right)}} \quad (4.14)$$

Разновидностью такого метода измерения расхода является измерение расхода с помощью диафрагмы.

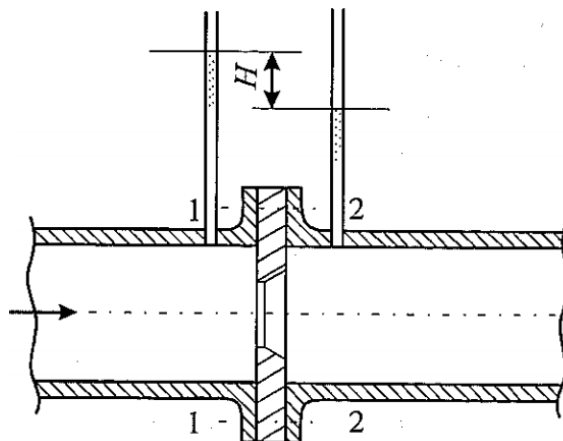


Рис. 4.4 Измерение расхода с помощью диафрагмы.

Для сечений 1-1 и 2-2 по уравнению неразрывности $W_1 \approx W_2$ и $z_1 = z_2$, тогда уравнение Бернулли запишется как

$$\frac{p_1}{\gamma} = \frac{p_2}{\gamma} + h_{1-2} \quad (4.15)$$

Потери между двумя сечениями h_{1-2} из-за малой длины участка представляют собой только потери на местных сопротивлениях:

$$h_{1-2} = h_m = \xi \frac{W^2}{2g} \quad (4.16)$$

Тогда

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \xi \frac{W^2}{2g} \quad (4.17)$$

Выражая отсюда скорость, получим:

$$W = \sqrt{\frac{2g(p_1 - p_2)}{\gamma \cdot \xi}} = \sqrt{\frac{2g(p_1 - p_2)}{\gamma \cdot \xi}} \quad (4.18)$$

Учитывая, что

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = H, \quad (4.19)$$

Где H – разность уровней в двух пьезометрах, можно записать

$$W = \sqrt{\frac{2gH}{\xi}} \quad (4.20)$$

Коэффициент местных потерь для диафрагмы с острыми кромками можно определить в зависимости от отношения площади отверстия в диафрагме и площади сечения трубы:

$$\xi = \left(\frac{1}{n \cdot \varepsilon} - 1 \right)^2, \quad (4.21)$$

где $n = \frac{F_o}{F}$ – отношение площади отверстия диафрагмы к площади сечения трубы, ε – коэффициент сжатия струи, который может быть рассчитан по формуле А.Д. Альтшуля:

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n} \quad (4.22)$$

Расход в жидкости в трубе:

$$Q = FW = F \sqrt{\frac{2gH}{\xi}} \quad (4.23)$$

Так как расходы газа при разных температурах и давлениях невозможно сравнивать, их приводят к нормальным условиям. Приведенный расход определяется по формуле

$$Q_o = Q \frac{p_o T}{p T_o}, \quad (4.24)$$

где T_o и p_o соответственно давление и температура при нормальных условиях

$$T_o = 273,15 \text{ К} \quad (4.25)$$

$$p_o = 101325 \text{ Па} \quad (4.26)$$

П о р я д о к в ы п о л н е н и я р а б о т ы

1. Ознакомится с принципом действия и конструкцией приборов для измерения скорости и расхода жидкости.
2. Замерить показания манометра и пьезометрических трубок.
3. Определить плотность и удельный вес газа в трубе по формуле $\rho = \rho_o \frac{p T_o}{p_o T}$,
4. Произвести расчет скорости и расхода газа.
5. Определить напоры газа в сечении трубы.
6. Определить приведенный расход
7. Результаты измерения оформить в виде таблицы

Лабораторная работа №5

Определение потерь напора на трение при движении жидкости в напорном трубопроводе

Ц е л ь р а б о т ы

Определение коэффициента гидравлического трения и сопоставление расчетных значений с экспериментальными.

О б щ и е с в е д е н и я

Потери напора на трение имеют повсеместный характер. Они вызваны как действием сил вязкости между отдельными слоями жидкости, движущимися с различными скоростями, так и соударениями частиц жидкости друг с другом и со стенками трубопровода.

Потери напора на трение в круглых напорных трубопроводах обычно рассчитываются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{W^2}{2g}, \quad (5.1)$$

где l – длина трубопровода; d – его диаметр; λ – так называемый коэффициент гидравлического трения или коэффициент трения, определяемый рядом условий, в первую очередь режимом движения жидкости.

Различают два режима движения жидкости – ламинарный и турбулентный. При ламинарном режиме все частицы жидкости двигаются параллельно друг другу в направлении общего течения жидкости. При этом истинные скорости движения частиц на разном удалении от стенок трубопровода различны, и в потоке имеет место как бы слоистый характер движения жидкости, где каждый из бесконечного множества слоёв объединяет частицы с одинаковой скоростью. Турбулентный режим характеризуется постоянным беспорядочным перемешиванием частиц движущейся жидкости.

Количественной мерой режима движения служит безразмерный критерий гидродинамического подобия – критерий Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{Wd}{\nu} = \frac{Wd}{\mu} \rho \quad (5.2)$$

Границей перехода из одного режима движения в другой считается обычное значение $\text{Re}=2320$ (критическое значение). При $\text{Re}<\text{Re}_{\text{кр}}$ режим движения ламинарный, при $\text{Re}>\text{Re}_{\text{кр}}$ – турбулентный.

Фактически переход из одного режима в другой в заметной степени зависит от условий этого перехода: формы потока, его диаметра, наличия в нём возмущений, от того, совершается ли переход от ламинарного режима к турбулентному или обратно. Так, перехода от ламинарного режима к турбулентному можно избежать даже при $\text{Re}=10000-20000$; в то же время обратный переход обычно происходит при $\text{Re}<2000-2300$.

Между чётко выраженными ламинарным и турбулентным режимами всегда существует область переходного режима. В силу большого трения около стенок трубы при турбулентном режиме всегда наблюдается тонкий слой жидкости в котором сохраняется ламинарное движение.

В области ламинарного режима коэффициент гидравлического трения λ рассчитывается по формуле:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (5.3)$$

При турбулентном режиме различают три зоны: зона гидравлически гладких труб (зона гладкого трения), зона смешенного трения и зона гидравлически шероховатых труб (автомодельный по отношению к числу Рейнольдса режим трения). Попадание в ту или иную зону зависит от соотношения шероховатости стенок трубы и толщины ламинарного подслоя.

Поскольку толщина ламинарного подслоя определяется значением Re :

$$\delta = \frac{34,2 d}{\text{Re}^{0,875}} \quad (5.4)$$

то одна и та же труба в одних условиях может быть гидравлически шероховатой, в других – гидравлически гладкой.

Для зоны гладкого трения при расчете коэффициента гидравлического трения применяется формула Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}}; \quad (5.5)$$

В этой зоне коэффициент трения не зависит от шероховатости стенки и определяется только величиной критерия Рейнольдса.

Для зоны смешанного трения – формула Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (5.6)$$

В этой зоне коэффициент трения зависит и от шероховатости стенки и от величины критерия Рейнольдса.

Для автомодельного режима – формула Шифринсона

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25} \quad (5.7)$$

Здесь коэффициент трения определяется только шероховатостью стенок трубы или канала.

Верхней границей зоны гладкого трения можно считать значение критерия Рейнольдса приблизительно равное

$$Re \approx 10 \left(\frac{d}{\Delta} \right); \quad (5.8)$$

Область смешанного или переходного трения наблюдается до значения критерия Рейнольдса, определяемого по соотношению

$$Re \approx 560 \left(\frac{d}{\Delta} \right) \quad (5.9)$$

Если подставить значения коэффициента гидравлического трения, вычисленного по зависимостям (5.3, 5.5-5.7) в формулу Дарси-Вейсбаха, то можно заметить, что при ламинарном режиме зависимость потерь напора на трение от скорости носит линейный характер, в зоне гладкого трения потери зависят от скорости в степени 1,75, при попадании в зону смешанного трения зависимость определяется степенью от 1,75 до 2, поэтому эта зона называется также доквадратичной областью сопротивлений, и, наконец, для автомодельного режима зависимость достигает второй степени, поэтому эта область называется квадратичной областью сопротивлений.

О п и с а н и е э к с п е р и м е н т а л ь н о й у с т а н о в к и

Лабораторный стенд состоит из горизонтального трубопровода, в начале и конце которого на расстоянии L установлены два пьезометра. Подача жидкости регулируется ручкой установки расхода.

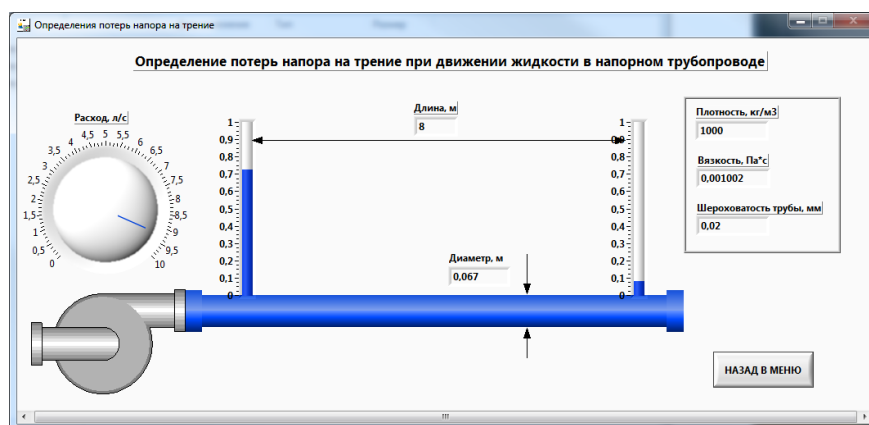


Рис. 5.1 Внешний вид лабораторного стенда

П о р я д о к в ы п о л н е н и я

1. Определить пьезометрические напоры по пьезометрам в начале и конце трубопровода
2. Определить среднюю скорость потока
3. Определить потери напора на трение
4. Определить коэффициент гидравлического трения

Лабораторная работа №6

Определение коэффициентов местных сопротивлений

Ц е л ь р а б о т ы

Изучение методов расчета потерь напора на местных сопротивлениях. Вычисление коэффициентов местных потерь напора для различных видов сопротивлений.

О б щ и е с в е д е н и я

Местные потери напора возникают в местах локальных возмущений потока, которые могут быть вызваны изменением формы или направления потока.

Величина местных потерь пропорциональна динамическому напору в данном сечении, поэтому ее выражают в долях этого напора по формуле Вейсбаха:

$$h_m = \xi \cdot h_{\text{дин}} = \xi \frac{W^2}{2g} \quad (6.1)$$

где ξ – коэффициент местного сопротивления, характеризующий данное сопротивление.

$$\xi = \frac{h_m}{h_{\text{дин}}} \quad (6.2)$$

Всё многообразие местных сопротивлений можно условно разделить на следующие основные группы:

1. сопротивления, связанные с изменением сечения

Для внезапного расширения коэффициент местного сопротивления определяется по формуле

$$\xi = \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right)^2 \quad (6.3)$$

Для внезапного сужения:

$$\xi = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{d}{D}\right)^2 \quad (6.4)$$

При плавных расширениях или сужениях на потери напора совместное влияние оказывают сопротивления, связанные с изменением формы сечения и потери на трение.

2. сопротивления, связанные с изменением направления движения (резкие и плавные повороты под разными углами);

3. сопротивления, связанные с разделением или слиянием потоков (тройники, крестовины, боковые отверстия в трубопроводе);

4. сопротивления, связанные с протеканием жидкости через разного рода арматуру (вентили, шибера, сетки, обратные клапаны и пр.).

О п и с а н и е э к с п е р и м е н т а л ь н о й у с т а н о в к и

Лабораторный стенд (рис. 6.1) состоит из трубопровода, составленного из последовательно соединенных труб различного сечения, колен и отводов разных углов. Расход жидкости в трубопроводе регулируется ручкой изменения расхода. По длине трубопровода установлены пьезометрические трубки для измерения пьезометрических напоров в различных сечениях.

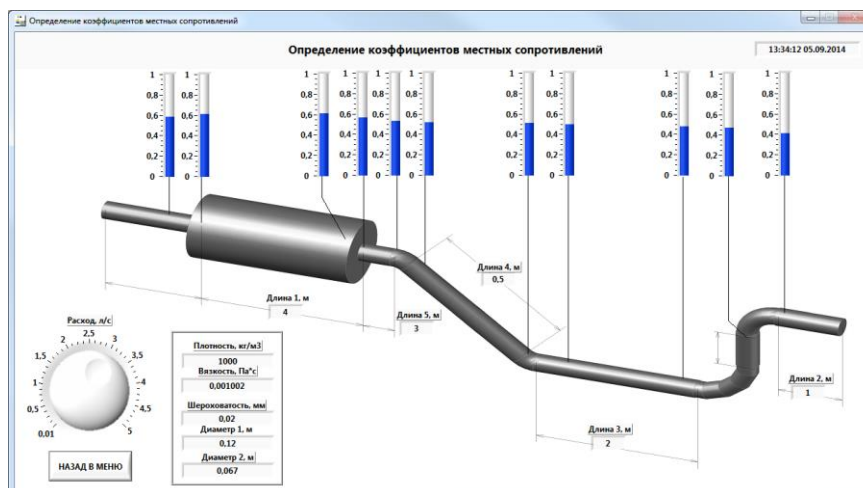


Рис. 6.1 Внешний вид лабораторного стенда

П о р я д о к в ы п о л н е н и я

1. С помощью ручки установки расхода выставить заданный расход жидкости в трубопроводе.
2. Определить значения пьезометрических напоров.
3. Определить скорости движения жидкости в исследуемых участках трубопровода.
4. Определить динамические напоры в исследуемых участках.
5. Определить значения потеряннного напора в исследуемых местных сопротивлениях.
6. Рассчитать значения коэффициентов местных сопротивлений.

Лабораторная работа №7

Построение характеристики сети

Ц е л ь р а б о т ы

Построить гидравлическую характеристику сложного трубопровода.

О б щ и е с в е д е н и я

С точки зрения методики гидравлического расчета все трубопроводы делят на простые и сложные, длинные и короткие.

Простым трубопроводом называется трубопровод постоянного диаметра без ответвлений. Всякий другой трубопровод будет сложным.

Сложные трубопроводы могут представлять собой последовательное соединение простых, последовательное и параллельное соединение простых, соединение нескольких простых трубопроводов в одном сечении (разветвленный трубопровод).

Длинными трубопроводами называются трубопроводы, в которых преобладают потери напора по длине. В случае длинных трубопроводов местными потерями напора обычно пренебрегают или принимают их равными 5-10% от потерь напора по длине.

Короткими называются трубопроводы, в которых местные потери напора составляют более 10%. При расчете этих трубопроводов учитывают как потери напора по длине, так и местные потери.

Решение гидравлических задач упрощается при использовании гидравлической характеристики трубопровода. Гидравлической характеристикой трубопровода называется зависимость суммарных потерь напора в трубопроводе $h_{\text{пот}}$ от объемного расхода жидкости Q :

$$h_{\text{пот}} = f(Q) \quad (7.1)$$

Она может быть выражена либо аналитически в виде формулы, либо в виде графика зависимости h от Q

Гидравлическая характеристика простого трубопровода

Общие потери напора в простом трубопроводе могут быть найдены простым суммированием потерь напора по длине и потерь напора на местных сопротивлениях

$$h_{\text{пот}} = h_{\text{тр}} + \sum h_{\text{м}} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi \right) \frac{W^2}{2g} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi \right) \frac{Q^2 16}{2g\pi^2 d^4} =$$
$$= \left(\frac{8\lambda}{\pi^2 g d^5} l + \frac{3}{\pi^2 g d^4} \sum \xi \right) Q^2, \quad (7.2)$$

где $\sum h_{\text{м}}$ - сумма потерь напора на всех местных сопротивлениях на данном трубопроводе; $\sum \xi$ - суммарный коэффициент местных сопротивлений.

$$\sum \xi = \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n \quad (7.3)$$

Для трубы данного диаметра и данной шероховатости в квадратной области сопротивлений постоянны сомножители:

$$\frac{8\lambda}{\pi^2 g d^5} = A_{\text{тр}}; \quad \frac{8}{\pi^2 g d^4} = A_{\text{м}} \quad (7.4)$$

Величины $A_{\text{тр}}$ и $A_{\text{м}}$ являются обобщенными параметрами трубопроводов и соответственно называются удельным сопротивлением трения (или по длине) и удельным местным сопротивлением

Величину $K = \frac{1}{\sqrt{A_{\text{тр}}}}$ называют расходной характеристикой трубопровода.

Для длинных трубопроводов расчёт $h_{\text{пот}}$ обычно производится лишь через величины $A_{\text{тр}}$ и K , которые берут в справочниках, а местные потери учитывают ориентировочно как некоторую долю потерь на трение:

$$h_{\text{пот}} = k A_{\text{тр}} l Q^2 = k \frac{l}{K^2} Q^2 \quad (7.5)$$

где k – коэффициент доли местных потерь, обычно $k=1,05-1,10$.

Сомножители, стоящие перед Q , для конкретного данного трубопровода являются постоянными величинами. Обозначив

$$b = \left(\frac{8\lambda}{\pi^2 g d^5} l + \frac{3}{\pi^2 g d^4} \sum \xi \right) = k A_{\text{тр}} l = k \frac{l}{K^2} \quad (7.6)$$

Окончательно получим

$$h_{\text{пот}} = b Q^2 \quad (7.7)$$

где b – сопротивление трубопровода.

При ламинарном режиме гидравлическая характеристика изображается прямой линией, проходящей через начало координат, так как в этом случае коэффициент гидравлического трения обратно пропорционален расходу (критерию Рейнольдса). Наклон характеристики определяется величиной коэффициента b , зависящей от гидравлического сопротивления трубопровода.

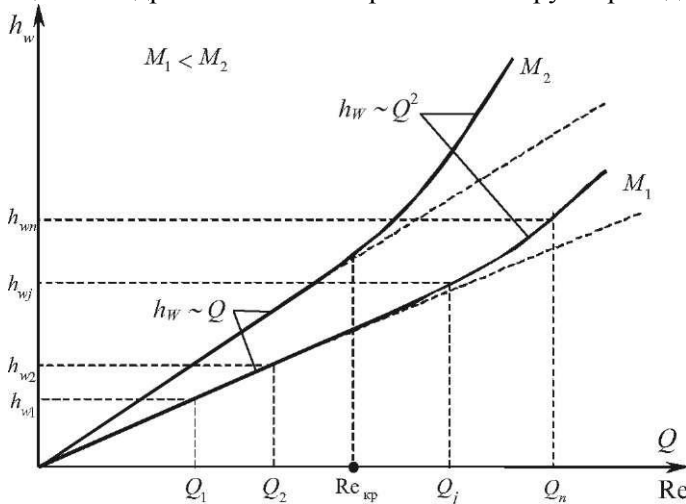


РИС. 7.1 ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОСТОГО ТРУБОПРОВОДА.

При турбулентном режиме и квадратичном законе сопротивления коэффициенты потерь напора, а следовательно, и коэффициент b , не зависят от числа Рейнольдса. Поэтому гидравлическая характеристика имеет вид параболы второй степени в соответствии с формулой. В случае, когда величина расхода Q , а следовательно, число Рейнольдса, определяемое ею, лежит в диапазоне между ламинарным и квадратичным турбулентным режимами, гидравлическая характеристика имеет нелинейный характер, отличный от квадратичного.

Гидравлические характеристики сложных трубопроводов

Для расчета гидравлической характеристики сложного трубопровода он разбивается на участки, представляющих собой простые трубопроводы

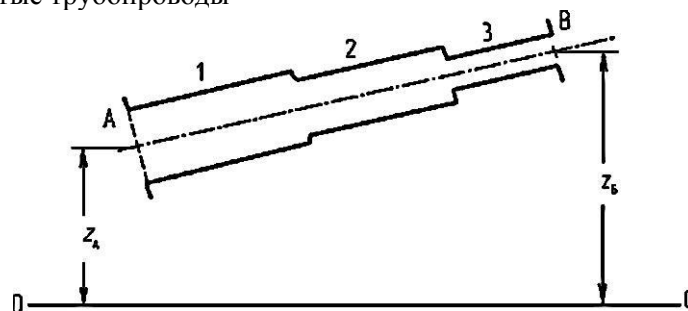


РИС. 7.2 ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ РАЗНОГО ДИАМЕТРА

При последовательном соединении трубопроводов разного диаметра общие потери напора соединения $h_{\text{ном}\Sigma}$ равны сумме потерь в отдельных трубопроводах, расход же жидкости по всей длине соединения одинаков и равен расходу в отдельном трубопроводе:

$$Q = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n \quad (7.8)$$

$$h_{\text{пот}\Sigma} = h_{\text{пот}1} + h_{\text{пот}2} + \dots + h_{\text{пот}n} =$$

$$= \sum_{i=1}^n h_{\text{пот}i} = b_1 Q^2 + b_2 Q^2 + \dots + b_n Q^2 = b_{\Sigma} Q^2 \quad (7.9)$$

где b_{Σ} - сопротивление всего соединения. Отсюда:

$$b_{\Sigma} = b_1 + b_2 + \dots + b_n = \sum_{i=1}^n b_i \quad (7.10)$$

Следовательно, для построения характеристики сложного трубопровода, представляющего собой последовательно соединенные простые трубопроводы необходимо сложить графики характеристик составляющих простых трубопроводов по вертикали, т. е. выполнить сложение потерь напора на всех участках при одинаковых расходах.

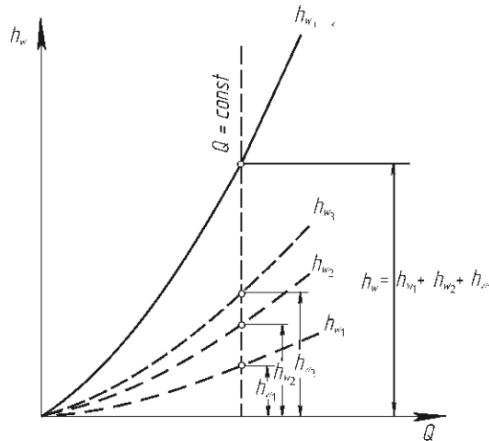


РИС. 7.3 ПОСТРОЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ

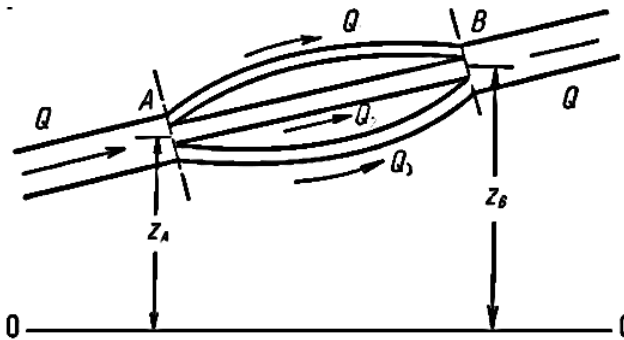


РИС. 7.4 ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ РАЗНОГО ДИАМЕТРА

При параллельном соединении трубопроводов полные напоры в узловых точках соединения (в местах разветвления и слияния ветвей) являются общими для каждой из ветвей и соединения в целом. Поэтому потери напора во всех ветвях также одинаковы и равны общим потерям напора на всём соединении:

$$h_{\text{пот}\Sigma} = h_{\text{пот}1} = h_{\text{пот}2} = \dots = h_{\text{пот}n} \quad (7.11)$$

Расходы жидкости в отдельных ветвях параллельного соединения различны и определяются сопротивлением ветвей. Общий расход в соединении Q_{Σ} равен сумме расходов ветвей:

$$Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (7.12)$$

Подставив значения Q_i получим:

$$\frac{\sqrt{h_{\text{пот}\Sigma}}}{\sqrt{b_{\Sigma}}} = \frac{\sqrt{h_{\text{пот}1}}}{\sqrt{b_1}} + \frac{\sqrt{h_{\text{пот}2}}}{\sqrt{b_2}} + \dots + \frac{\sqrt{h_{\text{пот}n}}}{\sqrt{b_n}} \quad (7.13)$$

$$\frac{1}{\sqrt{b_{\Sigma}}} = \frac{1}{\sqrt{b_1}} + \frac{1}{\sqrt{b_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{b_n}} \quad (7.14)$$

$$b_{\Sigma} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{b_1}} + \frac{1}{\sqrt{b_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{b_n}} \right)^2} = \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{b_i}} \right)^2} \quad (7.15)$$

Для построения характеристики сложного трубопровода, состоящего из параллельно соединенных простых трубопроводов, необходимо построить характеристики простых трубопроводов, а затем сложить эти характеристики по горизонтали, т. е. сложить расходы во всех простых трубопроводах при постоянных величинах потерь напора.

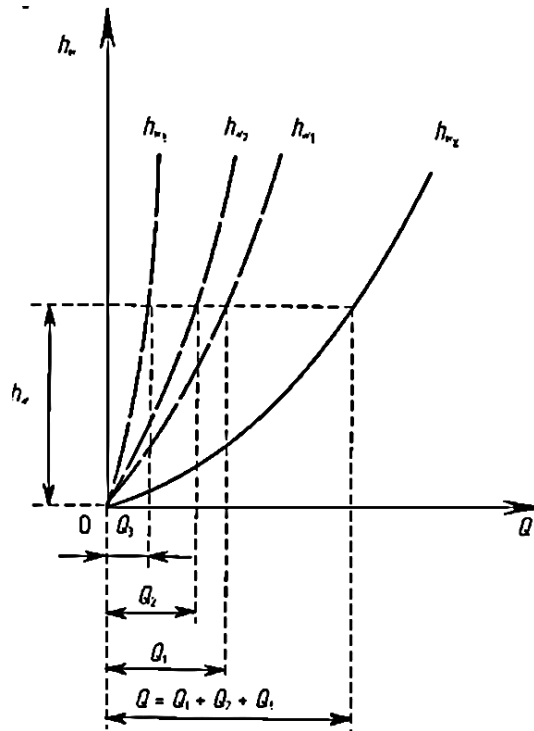


РИС. 7.5 ПОСТРОЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ

В общем случае, для сложного трубопровода, представляющего собой соединения последовательно и параллельно соединенных простых трубопроводов, сопротивление параллельных ветвей рассчитывается по правилам для параллельного соединения, а затем к ним прибавляются сопротивления последовательно соединенных трубопроводов:

$$b = b_1 + \left(\frac{1}{\sqrt{b_2}} + \frac{1}{\sqrt{b_3}} \right)^2 + b_4 \quad (7.16)$$

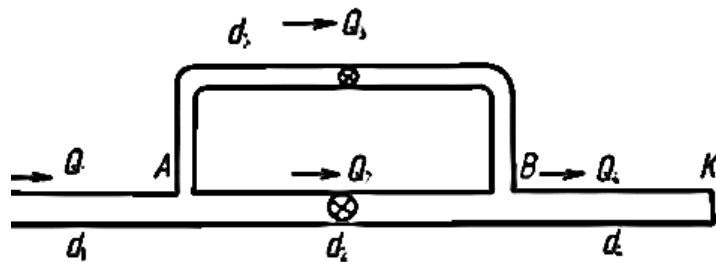


РИС. 7.6 СЛОЖНЫЙ ТРУБОПРОВОД, СОСТОЯЩИЙ ИЗ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Для графического построения характеристики такого трубопровода нужно рассчитать и построить характеристики простых трубопроводов, затем сложить по горизонтали характеристики трубопроводов соединенных параллельно. Полученную от сложения характеристик параллельного соединения далее необходимо сложить по вертикали характеристиками трубопроводов последовательного соединения.

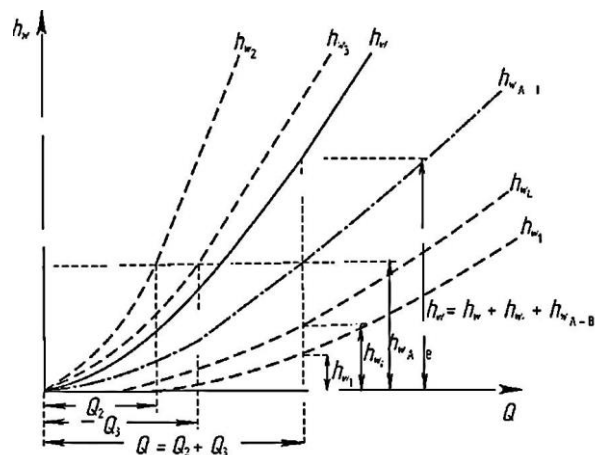


РИС. 7.7 ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРУБОПРОВОДА, СОСТОЯЩЕГО ИЗ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Описание экспериментальной установки

Лабораторный стенд представляет собой участок трубопроводной сети состоящий из простых трубопроводов различных сечений с участками последовательного и параллельного соединения.

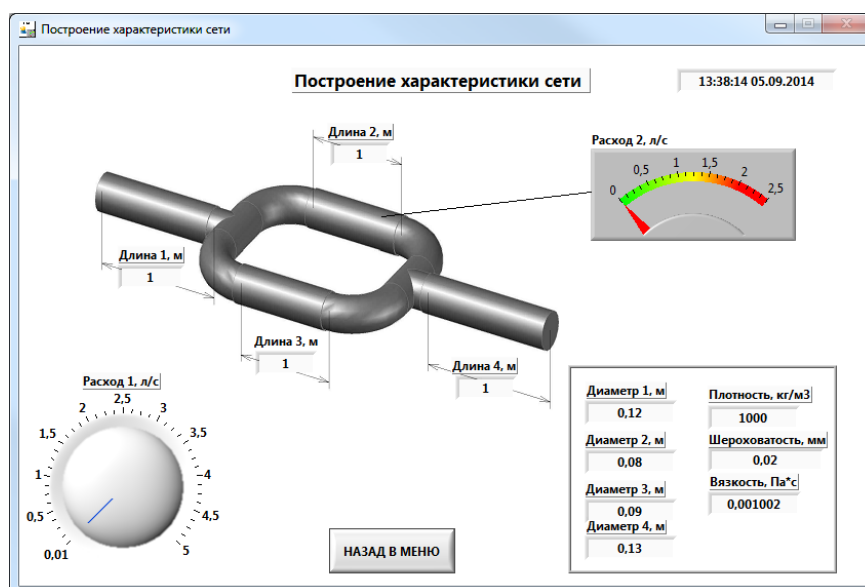


Рис. 7.8 Внешний вид лабораторного стенда

Порядок выполнения

1. Определить скорости и расходы на всех участках трубопроводной сети.
2. Рассчитать сопротивления простых участков трубопроводной сети
3. Рассчитать сопротивление параллельного соединения
4. Рассчитать сопротивление всей трубопроводной сети
5. Построить гидравлическую характеристику сети.

Лабораторная работа №8

Определение коэффициента теплопроводности материала

Цель работы

Измерение величины коэффициента теплопроводности материала при различной температуре.

Общие сведения

Количество теплоты, проходящей через плоскую однородную стенку в единицу времени, (Вт)

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) F \quad (1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К); t_1 и t_2 — температуры поверхностей стенки, К; F — площадь стенки, м²; δ — толщина стенки, м.

Поверхностная плотность теплового потока или удельный тепловой поток находится по формуле:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2), \text{ Вт / м}^2 \quad (2)$$

Отношение $\frac{\lambda}{\delta}$ называется тепловой проводимостью стенки, а обратная величина $\frac{\delta}{\lambda}$ — термическим сопротивлением стенки.

Для многослойной стенки

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \text{ Вт / м}^2 \quad (3)$$

Общее количество тепла, проходящее через многослойную стенку, определится по формуле:

$$Q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \cdot F = \frac{\lambda_{\text{экв}}}{\Delta} (t_1 - t_{n+1}) F, \quad (4)$$

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\Delta}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}} = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (5)$$

Где $\lambda_{\text{экв}}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности многослойной стенки; n — число слоев; Температура на поверхности слоев многослойной стенки:

$$t_{n+1} = t_1 - q \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (6)$$

В однослойной стенке температура изменяется по прямой, а в многослойной — по ломаной линии.

Величина λ , характеризующая способность вещества проводить тепло, зависит от природы вещества, являясь его индивидуальным свойством. Численные значения λ определяются опытным путем; для веществ, применяемых на практике, они приводятся в технических справочниках.

Опытные данные показывают, что величина λ для разных веществ сильно разнится, а для одного и того же вещества зависит от температуры, плотности, структуры, влажности и других факторов. Наибольшая теплопроводность наблюдается у металлов, для которых значения λ при 20 °С находятся в пределах 2,3—418 Вт/(м·К), причем верхний предел относится к серебру. Далее следуют красная медь ($\lambda = 395$), золото ($\lambda=300$), алюминий ($\lambda=210$), цинк ($\lambda=113$) и т.д. На коэффициенты теплопроводности металлов оказывают большое влияние примеси и их концентрация, а также структурные изменения, вызванные термической обработкой, ковкой, вытяжкой и т. п. Так, например, следы мышьяка уменьшают коэффициент теплопроводности меди на 60—65%, а 1% примесей понижает λ для алюминия на 15%. Величина λ для углеродистой стали падает с ростом содержания углерода, марганца и серы. В результате закалки коэффициент теплопроводности углеродистой стали снижается на 10%. Наконец, для большинства металлов величина λ уменьшается с ростом температуры.

Коэффициенты теплопроводности металлических сплавов не подчиняются правилу аддитивности, а должны определяться опытным путем. Так; например, присадка 5% никеля к углеродистой стали снижает величину λ почти на 50%. Для большинства металлических сплавов наблюдается рост λ с увеличением температуры, значительный до 273 К и несколько замедленный при более высоких температурах.

Коэффициенты теплопроводности неметаллических материалов лежат в пределах 0,02—3 Вт/(м·К) и зависят от природы этих материалов, их удельного веса, пористости, влажности, структурных особенностей. Для многокомпонентных материалов величина λ зависит еще от способа связывания составных частей. С повышением температуры значения λ для неметаллических материалов, как правило, возрастают, а с увеличением пористости уменьшаются. Увлажнение пористых материалов вызывает рост величины λ вследствие вытеснения воздуха водой, отличающейся более высокой теплопроводностью. При этом λ влажного материала часто превышает значения λ для сухого материала и воды в отдельности.

Коэффициенты теплопроводности капельных жидкостей составляют 0,09—0,7 Вт/(м·К), причем в области низких давлений для всех жидкостей, кроме воды и глицерина, они снижаются с повышением тем-

пературы. В области же высоких давлений наблюдается рост λ с увеличением как температуры, так и давления. Влияние давления на величину λ оказывается больше для жидкостей с более высокой сжимаемостью и более низкой температурой кипения, причем темп возрастания λ замедляется в области очень высоких давлений.

Коэффициенты теплопроводности газов находятся в пределах 0,006—0,6 Вт/(м·К), они растут, как правило, с температурой, но не зависят от давления в средней его области. При высоких давлениях λ увеличивается, а при давлениях ниже 0,13 Па уменьшается. Заметим, что с ростом молекулярной массы газа величина λ , как правило, снижается. Этим, между прочим, объясняется более быстрое охлаждение нагретых тел в среде водорода, чем в воздухе. Коэффициенты теплопроводности газовых смесей, как и жидких, не подчиняются правилу аддитивности.

В технических же расчетах значения коэффициента теплопроводности обычно берутся по справочным таблицам. При этом надо следить лишь за тем, чтобы физические характеристики материала (структура, плотность, влажность, температура, давление) были соответственными. Так как при распространении теплоты температура в различных частях тела различна, то в первую очередь важно знать зависимость коэффициента теплопроводности от температуры. Для большого числа материалов эта зависимость оказывается почти линейной, т. е. можно принять

$$\lambda = \lambda_0 (1 + b(t - t_0)) \quad (7)$$

где λ_0 — коэффициент теплопроводности при 0°C, b - постоянная, определяемая опытным путем.

Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд (см. рис. 1) состоит из электрического нагревателя 1 к которому прижат материал с известным коэффициентом теплопроводности 2. Под ним располагается исследуемый образец материала 3. Для определения температуры материалов на стенде используются 3 термопары.

Термопара 1 установлена непосредственно под нагревателем и измеряет температуру на верхней поверхности материала 1. Термопара 2 предназначена для измерения температуры в плоскости соприкосновения слоев материалов 1 и 2. Термопара 3 измеряет температуру на внешней поверхности материала 2.

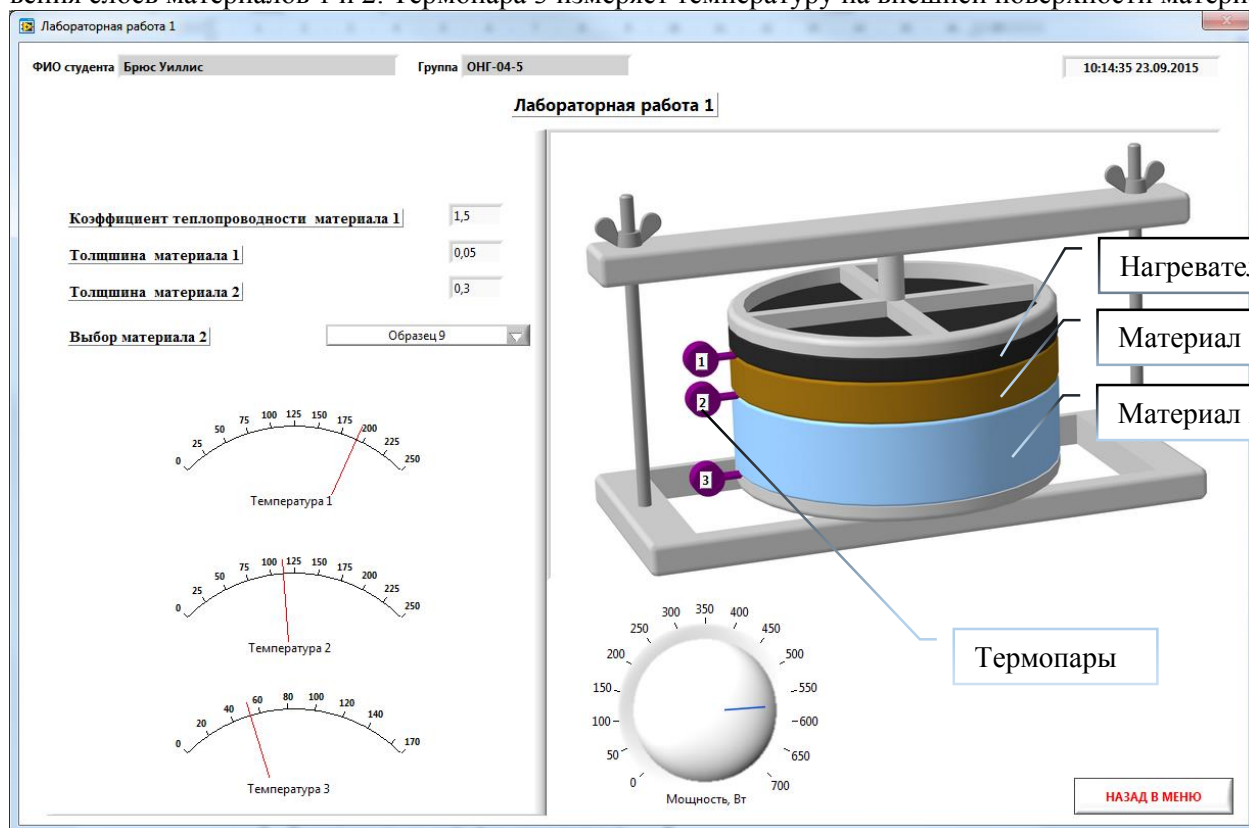


Рисунок 1 Общий вид лабораторного стенда

Порядок выполнения

1. Выбрать образец материала для исследования теплопроводности

2. Установить мощность нагревателя для создания теплового потока через материалы
3. Снять показания термопар
4. Определить тепловой поток через материал 1
5. Определить коэффициент теплопроводности материала 2
6. Повторить пункты 2-5
7. Результаты измерений оформить в виде таблицы

№ опыта	Термопара 1	Термопара 2	Термопара 3	q , Вт/м ²	λ_2

Обработка результатов измерений

1. Построить зависимость теплопроводности материала 2 от температуры
2. Аппроксимировать полученную зависимость по линейному закону $\lambda = \lambda_0(1 + bt)$
3. Построить график распределения температуры по толщине материала 2

Лабораторная работа № 9

«Определение коэффициента теплоотдачи при свободном движении воздуха»

Цель работы

Определение коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции воздуха вблизи горизонтальной трубы.

Общие сведения

Процесс конвективного теплообмена между поверхностью твердого тела и окружающей средой (жидкостью, газом) подчиняется весьма сложным закономерностям. Интенсивность этого процесса зависит от многих параметров, характеризующих свойства, состояние и режим перемещения среды, а также форму и размеры твердого тела. Так как математическое описание процесса конвективного теплообмена встречает непреодолимые затруднения, при его изучении за основу принимают более простую общую закономерность, называемую уравнением Ньютона-Рихмана.

Согласно закону Ньютона (1643-1717) и Рихмана (1711-1753гг.) тепловой поток от нагретой поверхности в окружающую среду в процессе теплоотдачи определяется по уравнению:

$$q = \alpha(t_c - t_{ж}) \quad \text{или} \quad Q = \alpha(t_c - t_{ж})F \quad (2.1)$$

где t_c - температура поверхности

$t_{ж}$ - температура жидкости (газа)

F - площадь поверхности

α - коэффициентом теплоотдачи. Характеризует интенсивность процесса теплоотдачи

Коэффициент теплоотдачи не является постоянной величиной, а зависит от многих параметров.

$$\alpha = f(l, w_{ж}, \lambda, c, \rho, \nu) \quad (2.2)$$

Коэффициент теплоотдачи обычно определяют экспериментально, по результатам обобщения ранее проведенных экспериментов.

В инженерной практике формулы для расчета коэффициента теплоотдачи, полученные путем обобщения многочисленных экспериментальных данных на основе теории подобия, в самом общем виде выражают функциональную зависимость безразмерных параметров:

$$Nu = f(Re, Pr, Gr...) \quad (2.3)$$

Каждый из безразмерных параметров имеет определенный физический смысл. Их принято обозначать первыми буквами фамилий ученых, внесших существенный вклад в изучение процессов теплоперевода и гидродинамики, и называть в честь этих ученых.

Число Нуссельта (1887—1957 гг.):

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (2.4)$$

представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи.

Число Рейнольдса (1842—1912):

$$Re = \frac{w_{\text{ж}} l}{\nu} \quad (2.5)$$

Число Прандтля (1875—1953):

$$Pr = \frac{c \rho \nu}{\lambda} \quad (2.6)$$

состоит из величин, характеризующих теплофизические свойства вещества и по существу само является теплофизической константой вещества.

Число Грасгофа:

$$Gr = g \beta (t_c - t_{\text{ж}}) l^3 / \nu^2 \quad (2.7)$$

характеризует отношение подъемной силы, возникающей вследствие теплового расширения жидкости, к силам вязкости.

При свободной конвекции температура жидкости (газа) в пограничном слое изменяется от t_c до $t_{\text{ж}}$ а ее скорость, равная нулю у стенки, проходит через максимум и снова падает до нуля на некотором удалении от стенки.

Для свободной конвекции, параметры сухого воздуха, входящие в критерии подобия, определяются по средней температуре пограничного слоя

$$t_{\text{нозр}} = (t_c + t_{\text{ж}}) / 2 \quad (2.8)$$

Для расчета средних коэффициентов теплоотдачи в случае ньютоновских жидкостей (газов) пользуются следующей формулой:

$$Nu_{\text{ж}} = A (Gr_{\text{ж}} \cdot Pr_{\text{ж}})^n \quad (2.9)$$

Численные значения A и n для распространенных случаев теплоотдачи приведены в таблице.

Таблица 2.1

Случаи теплоотдачи	A	n	$l_{\text{опр}}$	Границы применения
Горизонтальная труба, сфера	0,5	0,25	d	$10^3 < Gr_{\text{ж}} \cdot Pr_{\text{ж}} < 10^8$
	1,18	0,125	d	$10^{-3} < Gr_{\text{ж}} \cdot Pr_{\text{ж}} < 10^3$
	1,35	0,33	d	$Gr_{\text{ж}} \cdot Pr_{\text{ж}} > 10^8$
Вертикальные трубы, цилиндры (теплообмен с наружной поверхности), пластины	0,76	0,25	h	$10^3 < Gr_{\text{ж}} \cdot Pr_{\text{ж}} < 10^9$
	0,15	0,33	h	$Gr_{\text{ж}} \cdot Pr_{\text{ж}} > 10^9$
Горизонтальные пластины, обращенные нагретой стороной вверх	0,14	0,33	$l_{\text{мин}}$	$2 \cdot 10^7 < Gr_{\text{ж}} Pr_{\text{ж}} < 3 \cdot 10^{10}$
	0,54	0,25	$l_{\text{мин}}$	$10^5 < Gr_{\text{ж}} \cdot Pr_{\text{ж}} < 2 \cdot 10^7$

Случаи теплоотдачи	A	n	$l_{\text{опр}}$	Границы применения
Горизонтальные пластины, обращенные нагретой стороной вниз	0,27	0,25	$l_{\text{мин}}$	$3 \cdot 10^5 < Gr_{\text{ж}} \cdot Pr_{\text{ж}} < 3 \cdot 10^{10}$

Коэффициент теплоотдачи α вычисляется по уравнению (2.1)

Количество тепла, передаваемое конвекцией от наружной поверхности трубы определяется по уравнению

$$Q_k = Q - Q_l \quad (2.10)$$

где Q - результирующий тепловой поток, равный при стационарном режиме мощности нагревателя.
Вт:

$$Q = \frac{U^2}{R} = \frac{I^2 R^2}{R} = I^2 R = UI \quad (2.11)$$

где U - падение напряжения на рабочем участке, В; R - электрическое сопротивление участка. Ом,
 I - сила тока, А.

Количество тепла Q_l , Вт. передаваемое путем теплового излучения, определяется по уравнению Стефана-Больцмана:

$$Q_{1,2} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 F \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) \quad (2.12)$$

$C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ коэффициент излучения абсолютно черного тела.

$\varepsilon_{\text{пр}}$ - приведенная степень черноты системы тел. Так как поверхность окружающих тел во много раз больше, чем поверхность трубы, то можно принять, что $\varepsilon_{\text{пр}}$ равна степени черноты трубы.

Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд (см. рис. 1) состоит из горизонтальной трубы 1, внутрь которой вмонтирован электрический нагреватель. Мощность нагревателя регулируется ручкой мощности 2. Напряжение и сила тока, проходящие через нагреватель измеряются вольтметром 3 и амперметром 4. Температура воздуха измеряется ртутным термометром 6. Температура поверхности трубы измеряется тремя термопарами 5.

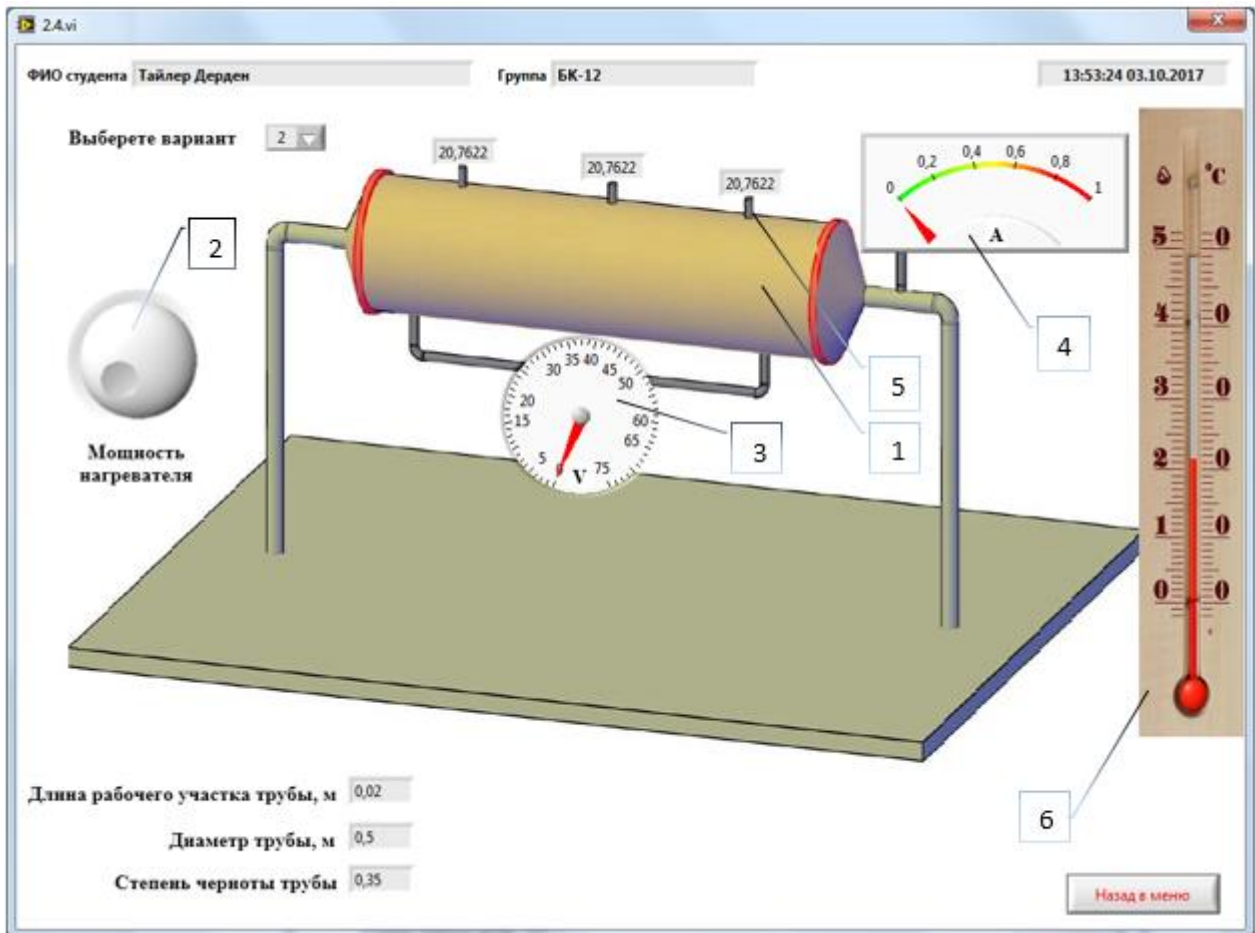


Рисунок 2.1 Общий вид лабораторного стенда

Порядок выполнения работы

Все замеры необходимо проводить только после установившегося (стационарного) режима.

1. Выставить напряжение нагревателя для создания теплового потока
2. По показаниям вольтметра и амперметра определить мощность нагревателя
3. Снять показания термометра.
4. Определить среднюю температуру трубы.
5. Повторить пункты 1-4.
6. Результаты измерений оформить в виде таблицы

№ опыта	U, V	I, A	Q_n, Bm	$T_1, ^\circ C$	$T_2, ^\circ C$	$T_3, ^\circ C$	$T_{cp}, ^\circ C$	Q_l, Bm	Q_k, Bm	$\alpha, \frac{Bm}{m^2 \cdot K}$	Nu	Gr	Pr
---------	--------	--------	-----------	-----------------	-----------------	-----------------	--------------------	-----------	-----------	----------------------------------	------	------	------

Обработка результатов измерения

1. Определить тепловой поток излучением
2. Определить тепловой поток теплоотдачи
3. Определить коэффициент теплоотдачи
4. Определить значения $Nu, Gr_{ж}, Pr_{ж}$ для воздуха
5. Построить график зависимости $\lg(Gr_{ж} \cdot Pr_{ж})$ от $\lg(Nu)$
6. Аппроксимировать зависимость по линейному закону $\lg(Nu) = \lg(A) + n \cdot \lg(Gr_{ж} \cdot Pr_{ж})$
7. Определить опытные значения A и n . Значение n определяется по тангенсу угла наклона к оси абсцисс, а коэффициент A из зависимости (2.9)

Физические свойства сухого воздуха

Температура	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\mu \cdot 10^6, \text{ Па} \cdot \text{с}$	Pr
0	1,293	2,44	17,2	0,707
10	1,247	2,51	17,6	0,705
20	1,205	2,59	18,1	0,703
30	1,165	2,67	18,6	0,701
40	1,128	2,76	19,1	0,699
50	1,093	2,83	19,6	0,698
60	1,060	2,90	20,1	0,696
70	1,029	2,96	20,6	0,694
80	1,000	3,05	21,2	0,692
90	0,972	3,13	21,5	0,690
100	0,946	3,21	21,9	0,688
120	0,898	3,34	22,8	0,686
140	0,854	3,49	23,7	0,684
160	0,815	3,64	24,5	0,682
180	0,779	3,78	25,3	0,681
200	0,746	3,93	26,0	0,680

Лабораторная работа № 10 «Определение степени черноты поверхности материала»

Цель работы:

Провести эксперимент по определению степени черноты поверхности цилиндра.

Общие сведения

Тепловое излучение есть результат превращения внутренней энергии тел в энергию электромагнитных колебаний. При попадании тепловых лучей (волн) на другое тело их энергия частично поглощается им, снова превращаясь во внутреннюю. Так осуществляется лучистый теплообмен между телами.

Тепловое излучение как процесс распространения электромагнитных волн характеризуется длиной волны λ и частотой колебаний $\nu = \frac{c}{\lambda}$, где c — скорость света (в вакууме $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$).

Все виды электромагнитного излучения имеют одинаковую природу, поэтому классификация излучения по длинам волн в зависимости от производимого ими эффекта носит лишь условный характер. При температурах, с какими обычно имеют дело в технике, основное количество энергии излучается при $\lambda = 0,8 \text{--} 80 \text{ мкм}$. Эти лучи принято называть *тепловыми (инфракрасными)*. Большую длину имеют радиоволны, меньшую — волны видимого (*светового* $0,4 \text{--} 0,8 \text{ мкм}$) и *ультрафиолетового* излучения.

Поток излучения через единицу поверхности обычно оценивают **поверхностной плотностью потока излучения**.

Тепловой поток, излучаемый на всех длинах волн с единицы поверхности тела по всем направлениям, называется **поверхностной плотностью потока интегрального излучения** E , Вт/м². Она определяется природой данного тела и его температурой. Это собственное излучение тела.

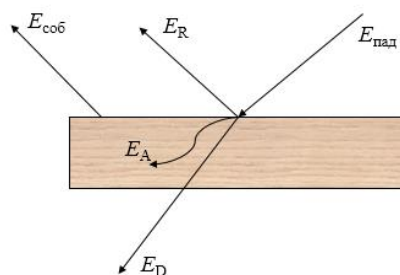


Рис. 3.1. Распределение энергии излучения, падающей на тело

Часть энергии излучения $E_{\text{пад}}$, падающей на тело (рис. 3.1), поглощается (E_A) часть отражается (E_R) и часть проникает сквозь него (E_D).

Поток, испускаемый телом (средой) вследствие теплового излучения, называют потоком **собственного излучения**.

Поток энергии, падающий на рассматриваемую поверхность тела, получил название потока **падающего излучения**.

Часть потока падающего излучения, отраженная телом (средой), названа потоком **отраженного излучения**.

Часть потока падающего излучения, поглощенная телом (средой), называют потоком **поглощенного излучения**.

Таким образом,

$$E_A + E_K + E_D = E_{\text{пад}} \quad (3.1)$$

Это уравнение теплового баланса можно записать в безразмерной форме:

$$A + R + D = 1 \quad (3.2)$$

Величина $A = \frac{E_A}{E_{\text{пад}}}$ называется **коэффициентом поглощения**, $R = \frac{E_R}{E_{\text{пад}}}$ — **коэффициентом отражения**, $D = \frac{E_D}{E_{\text{пад}}}$ — **коэффициентом пропускания**.

Тело, поглощающее все падающее на него излучение, называется **абсолютно**. Для этого тела $A = 1$. Тела, для которых коэффициент $A < 1$ и не зависит от длины волны падающего излучения, называются **серыми**. Для **абсолютно белого** тела $R = 1$, для **абсолютно прозрачного** $D = 1$.

Интенсивность излучения абсолютно черного тела и любого реального тела зависит от температуры и длины волны (рис.2).

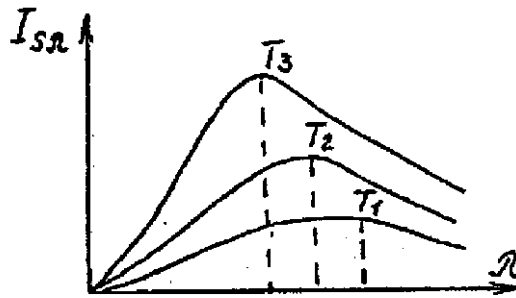


Рис. 2.

Для любой температуры интенсивность излучения $I_{s\lambda}$ возрастает от нуля при $\lambda = 0$ до своего максимального значения при определенной длине волны, а затем убывает до нуля при $\lambda = \infty$. При повышении температуры интенсивность излучения возрастает (закон Планка):

$$I_{s\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1}, \text{ Вт/м}^2 \quad (3.3)$$

Кроме этого из рис.2 следует, что максимумы кривых с повышением температуры смещаются в сторону более коротких волн. Длина волны, отвечающая максимальному значению $I_{s\lambda}$, определяется законом смещения Вина:

$$\lambda_{\text{max}} T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К} \quad (3.4)$$

Поверхностная плотность потока интегрального излучения абсолютно черного тела в зависимости от его температуры описывается законом **Стефана - Больцмана**:

$$E_0 = \sigma_0 T^4 \quad (3.5)$$

Здесь $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — постоянная Стефана—Больцмана.

Для технических расчетов закон Стефана — Больцмана обычно записывают в виде

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (3.6)$$

где $C_0 = \sigma_0 \cdot 10^8 = 5,67 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ называется коэффициентом излучения абсолютно черного тела.

Тела, с которыми мы имеем дело на практике, излучают меньше тепловой энергии, чем абсолютно черное тело при той же температуре.

Отношение поверхностной плотности потока собственного интегрального излучения E данного тела к поверхностной плотности потока интегрального излучения E_0 абсолютно черного тела при той же температуре называется степенью черноты этого тела:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} \quad (3.7)$$

Степень черноты ε меняется для различных тел от нуля до единицы в зависимости от материала, состояния поверхности и температуры. Из закона Кирхгофа также следует, что степень черноты серого тела при одной и той же температуре численно равна коэффициенту поглощения:

$$\varepsilon = A$$

Используя понятие степени черноты, можно записать закон Стефана—Больцмана для реального тела:

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (3.8)$$

Энергия, излучаемая поверхностью тела, имеющего температуру T температуры (закон Стефана-Больцмана):

$$E = C \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (3.9)$$

Где $C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ - коэффициент излучения абсолютно черного тела, ε - степень черноты тела, C - коэффициент излучения серого тела.

Теплообмен излучением между двумя параллельными поверхностями, Вт:

$$Q = C_0 \varepsilon_{np} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F \quad (3.10)$$

где T_1 - и T_2 - абсолютная температура поверхностей, К; F - поверхность излучения; ε_{np} - приведенная степень черноты системы тел.

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (3.11)$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - степени черноты, соответствующие поверхностям теплообмена.

Теплообмен излучением между двумя поверхностями F_1 и F_2 , когда поверхность F_2 окружает поверхность F_1 может рассчитываться по формулам для плоских параллельных поверхностей, но приведенная степень черноты будет равно:

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (3.12)$$

Если F_1 значительно меньше F_2 , то $\varepsilon_{np} = \varepsilon_1$

Описание лабораторной установки

Тепловой баланс теплообмена цилиндра с окружающей средой может быть записан в виде

$$Q = Q_{\lambda} + Q_{\kappa} + Q_T \quad (3.13)$$

Где

$$Q_{\delta} = C_o \varepsilon_{np} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F - \text{тепловой поток отдаваемый излучением с поверхности цилиндрической стенки,}$$

$$Q_{\kappa} = \alpha \cdot (T_1 - T_2) \cdot F - \text{тепловой поток отдаваемый конвекцией с поверхности цилиндрической стенки,}$$

$$Q_T - \text{тепловой поток с торцов цилиндра}$$

Определения тепловых потоков, передаваемых конвекцией с цилиндрической поверхности и тепла, отдаваемого с торцов, можно избежать, если использовать метод двух эталонов. Для этого используются три одинаковых цилиндра, изготовленных из одного и того же материала, но имеющих различную степень черноты поверхности. Внутри каждого цилиндра помещен электронагревательный элемент. Степень черноты двух цилиндрических поверхностей известна (белый и черный эталоны).

Если все три тела поместить в одинаковые условия и с помощью электрических нагревателей установить на поверхности каждого одинаковую температуру, то формулы стационарного теплообмена будут иметь вид:

$$Q_{\delta} = C_o \varepsilon_{\delta} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F + \alpha \cdot (T_1 - T_2) \cdot F + Q_T \quad (3.14)$$

$$Q_{\kappa} = C_o \varepsilon_{\kappa} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F + \alpha \cdot (T_1 - T_2) \cdot F + Q_T \quad (3.15)$$

$$Q_x = C_o \varepsilon_x \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F + \alpha \cdot (T_1 - T_2) \cdot F + Q_T \quad (3.16)$$

Где Q_{δ} , Q_{κ} - тепловые потоки от «белого», «черного» эталонов, Q_x - тепловой поток от цилиндра с неизвестной степенью черноты.

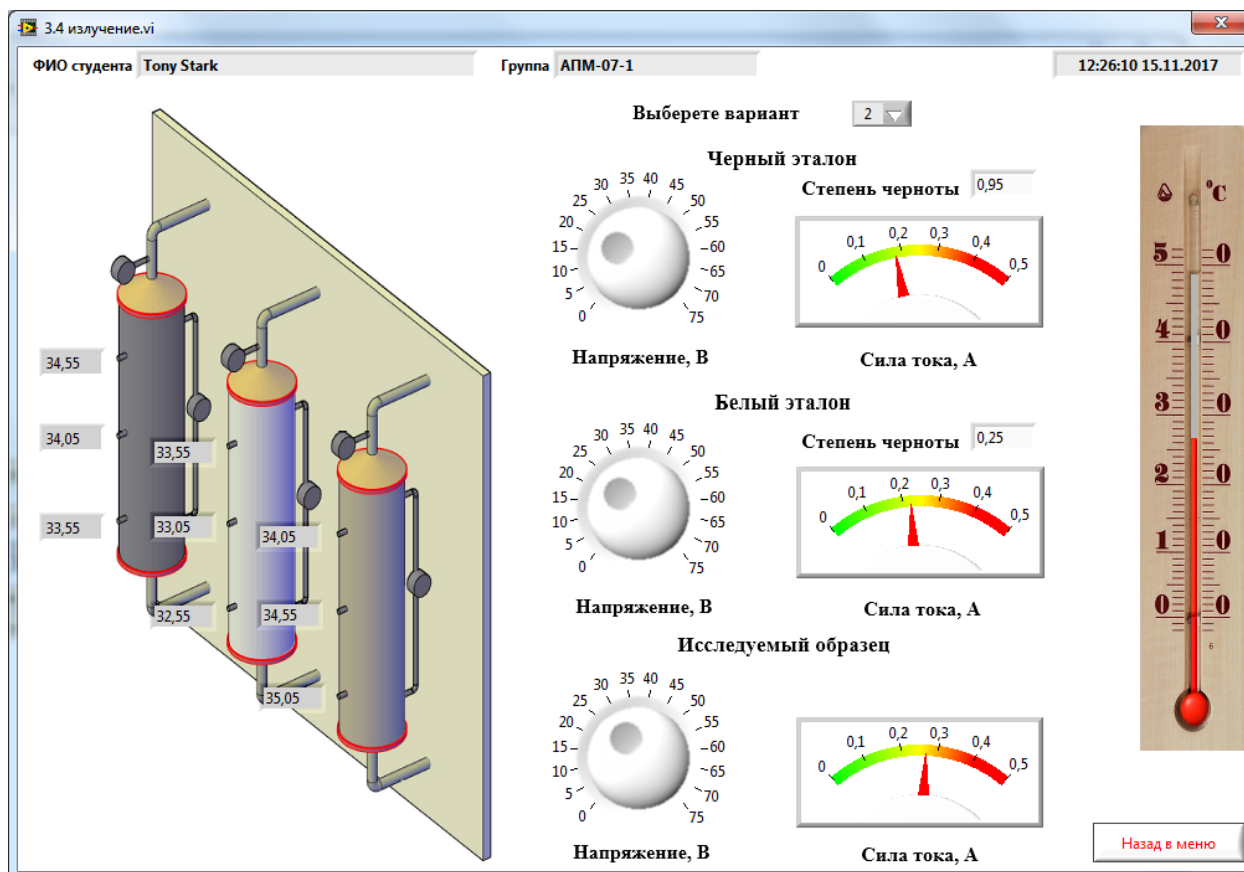
Вычитая (3.16) из (3.15) и (3.14) из (3.16), получим

$$Q_{\kappa} - Q_x = C_o (\varepsilon_{\kappa} - \varepsilon_x) \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F \quad (3.17)$$

$$Q_x - Q_{\delta} = C_o (\varepsilon_x - \varepsilon_{\delta}) \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F \quad (3.18)$$

Из соотношений (3.17) и (3.18) следует

$$\frac{Q_{\kappa} - Q_x}{Q_x - Q_{\delta}} = \frac{\varepsilon_{\kappa} - \varepsilon_x}{\varepsilon_x - \varepsilon_{\delta}} \quad (3.19)$$



Приняв

$$W = \frac{Q_{\text{ч}} - Q_{\text{х}}}{Q_{\text{х}} - Q_{\text{б}}} \quad (3.20)$$

Получим выражение для расчета неизвестной степени черноты:

$$\varepsilon_{\text{х}} = \frac{\varepsilon_{\text{ч}} + \varepsilon_{\text{б}} \cdot W}{1 + W} \quad (3.21)$$

Лабораторная установка включает три одинаковых трубчатых элемента. Одна из эталонных трубок покрыта сажей ($\varepsilon_{\text{ч}} = 0,95$), вторая изготовлена из отполированного металла ($\varepsilon_{\text{б}} = 0,25$). Степень черноты образца ($\varepsilon_{\text{х}}$) неизвестна. Напряжение нагревательных элементов регулируется с помощью автотрансформаторов. Ток контролируется с помощью амперметра. ЭДС, соответствующая температуре поверхности, измеряется термопарой.

Порядок проведения работы

1. При помощи автотрансформаторов устанавливается мощность нагревателей «белого» и «черного» тел, которая обеспечивает равенство температур поверхностей эталонов.

Пользуясь автотрансформатором нагревательного элемента образца, необходимо добиться такого режима, когда ЭДС термопары образца сравняется с ЭДС, термопар эталонов. Это и будет говорить о равенстве температур на всех трех поверхностях.

Снять показания вольтметра и амперметра для каждого нагревательного элемента.

4. Определить мощность нагревательного элемента $W = IU$

Данные наблюдений заносят в таблицу и проводят соответствующие вычисления.

ЭДС, мВ	1 – исследуемый образец			2 - черное тело			3 - белое тело		
	I, A	U, B	$\frac{Q}{Bm}$	I, A	U, B	$\frac{Q}{Bm}$	I, A	U, B	Q, Bm

Контрольные вопросы

Назовите основные законы теплового излучения.

Что называют поглотательной, отражательной и проникающей способностью тел?

Дайте определение степени черноты тела и от чего она зависит.

Особенности излучения газов.

Серые тела. Предел изменения степени черноты.

Литература

1. Исаченко В.П., Осипова В. А., Сукомел А.С. Теплопередача. - М.: Энергия, 1981.

2. Недужий И.А., Алабовский. Техническая термодинамика и теплопередача: Учеб. Пособие для ВУ-Зов. 2 изд., перераб. И доп. Киев: Вища школа, 1981.

Библиографический список

1. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука 1972 г.

2. Касаткин. А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник.- 9-е изд., испр. - М.: Химия, 1973. - 752 с.

3. Кикоин А.К. Молекулярная физика / И. К. Кикоин, А. К. Кикоин .- 4-е изд., стер. - Санкт Петербург : Лань, 2008. - 480 с.

4. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: учеб. пособие для вузов.- 3-е изд. - Москва : Оникс : Мир и образование, 2006. - 360 с.

5. Плановский А.Н. Процессы и аппараты химической технологии [Текст] : учебник / А. Н. Плановский, В. М. Рамм, С. З. Каган.- 5-е изд., стер. - М. : Химия, 1968. - 848 с

6. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры: учеб. для вузов /. - М. : Энергия, 1977. - 424 с.