



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»

НАГНЕТАТЕЛИ И ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Лабораторный практикум

Часть 1

**Минск
БНТУ
2024**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»

НАГНЕТАТЕЛИ И ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Лабораторный практикум
для студентов специальности 1-43 01 05
«Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»
дневной и заочной формы обучения

В 3 частях

Часть 1

*Второе издание,
исправленное и дополненное*

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области энергетики и энергетического оборудования*

Минск
БНТУ
2024

УДК 621.516+621.4(075.8)

ББК 31.38я7

А36

С о с т а в и т е л и:

*З. Б. Айдарова, В. И. Чернышевич,
Н. Н. Сапун, Т. В. Рыжова*

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра «Энергетика» УО БГАТУ;
зав. кафедрой, канд. техн. наук, доцент *А. М. Кравцов*,
канд. техн. наук, доцент *К. Э. Гаркуша*;
главный специалист научно-исследовательского
и проектного РУП «БЕЛТЭИ» *В. С. Хадатович*

Нагнетатели и тепловые двигатели : лабораторный практикум
А36 для студентов специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника» дневной и заочной формы обучения : в 3 ч. /
сост.: З. Б. Айдарова [и др.]. – Минск : БНТУ, 2024. – Ч. 1. – 40 с.
ISBN 978-985-583-968-3 (Ч. 1).

В лабораторном практикуме приведено описание лабораторных работ по дисциплине «Нагнетатели и тепловые двигатели» в соответствии с учебной программой для студентов специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника» дневной и заочной формы обучения. Каждой работе предшествует теоретическая часть. В описании каждой лабораторной работы приведена схема экспериментальной установки, состав контрольно-измерительного оборудования, порядок проведения работы, контрольные вопросы и литература.

УДК 621.516+621.4(075.8)

ББК 31.38я7

ISBN 978-985-583-968-3 (Ч. 1)

ISBN 978-985-583-967-6

© Белорусский национальный
технический университет, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Правила охраны труда.....	4
Лабораторная работа № 1 СНЯТИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ВЕНТИЛЯТОРА.....	5
Лабораторная работа № 2 СНЯТИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА	111
Лабораторная работа № 3 СНЯТИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА	15
Лабораторная работа № 4 СНЯТИЕ КАВИТАЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА	23
Лабораторная работа № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ, ИМЕЮЩИХ ОДИНАКОВЫЕ РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	28
Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ, ИМЕЮЩИХ РАЗЛИЧНЫЕ РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	33
Литература	40

ПРАВИЛА ОХРАНЫ ТРУДА

Помещение лаборатории по степени опасности поражения электрическим током относится к категории повышенной опасности.

1. Источником опасности в лаборатории является напряжение электрического тока 220 В.

2. Перед началом работы необходимо тщательно ознакомиться с оборудованием, материалами, инструментом, правилами безопасной работы с ними, проверить наличие и исправность ограждения, предохранительных устройств, заземлений. Все лабораторное электрооборудование должно быть надежно заземлено (занулено).

3. Включение цепи под напряжением допускается только после ее проверки преподавателем или лаборантом. Любое изменение электрической схемы должно производиться при отключенном рубильнике.

4. Во время лабораторных занятий следует находиться непосредственно у лабораторной установки, на которой выполняется работа.

5. При обнаружении неисправностей, которые могут вызвать поражение электрическим током или порчу приборов и оборудования, немедленно отключите рубильник, прекратите работу и поставьте в известность преподавателя или лаборанта.

6. Если с Вашим товарищем произошел несчастный случай, немедленно сообщите об этом руководителю работ для оказания первой помощи.

7. По окончании работы, прежде чем покинуть лабораторию, приведите в порядок рабочее место, сдайте приборы, материалы, инструкции лаборанту.

Лабораторная работа № 1

СНЯТИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ВЕНТИЛЯТОРА

Цель работы: снятие универсальной характеристики центробежного вентилятора.

Общие сведения

Испытание гидравлических машин производится с целью определения их аэродинамических и гидравлических параметров: производительности (подачи), полного и статического давления, полезной и потребляемой мощности, КПД, условий бесшумной работы, прочности конструкции и т. п.

Графически выраженные зависимости между развиваемым полным P_n или статическим давлением $P_{ст}$, полезной мощностью N , КПД η и производительностью Q при постоянном числе оборотов называют индивидуальной характеристикой нагнетателя, причем зависимость $P = f(Q)$ является основной.

При помощи характеристик можно подбирать нагнетатели для работы в данной установке, анализировать различные случаи совместной работы нагнетателей, судить об экономичности их работы.

Характеристики нагнетателей определяют экспериментально. Универсальные характеристики представляют совокупность индивидуальных характеристик, построенных при некоторой частоте вращения. Общая методика определения характеристик большинства гидравлических машин обычно сводится к следующему.

Нагнетатель присоединяют к трубопроводу (к сети) с переменным сопротивлением (задвижка, шибер и т. п.). Поддерживая постоянным число оборотов нагнетателя, производят измерение статического и динамического давлений, а также производительности для каждой регулирующей насадки.

Подачей (производительностью) вентилятора называется количество жидкости, подаваемое вентилятором в единицу времени.

Объемная производительность вентилятора Q измеряется в $\text{м}^3/\text{с}$ и определяется как

$$Q = C_{\text{ср}} \cdot F, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1.1)$$

где $C_{\text{ср}}$ – средняя скорость движения потока в напорном трубопроводе, м/с;

F – площадь поперечного сечения трубопровода, м².

Массовый расход M измеряется в кг/с.

Связь между массовым расходом и объемным имеет следующий вид:

$$M = \rho \cdot Q, \text{ кг/с}, \quad (1.2)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Величина производительности вентилятора зависит от его геометрических размеров, числа оборотов и гидравлических свойств сети, в которую вентилятор подает газ.

Под напором H , создаваемым вентилятором, подразумевают энергию, сообщаемую каждому килограмму среды, передаваемой вентилятором. Наряду с понятием «напор» для характеристики работы вентиляторов используют понятие «давление» P , подразумевая под ним энергию, сообщенную 1 м³ газа:

$$P = \rho \cdot g \cdot H, \text{ Дж/м}^3, \text{ Па}. \quad (1.3)$$

В общем случае полное давление $P_{\text{п}}$, создаваемое вентилятором, равно сумме статического $P_{\text{ст}}$ и динамического (скоростного) $P_{\text{д}}$ давления:

$$P_{\text{п}} = P_{\text{ст}} + P_{\text{д}}, \text{ Па}. \quad (1.4)$$

Статическое давление – приращение удельной статической энергии, *динамическое давление* – приращение удельной кинетической (скоростной) энергии.

Динамическое давление определяется из выражения

$$P_{\text{д}} = \frac{\rho \cdot C_{\text{ос}}^2}{2}, \text{ Дж/м}^3, \text{ Па}. \quad (1.5)$$

В системе МКГСС давление измеряется, как и напор, в мм вод. ст.; в системе СИ единицы измерения в 9,81 раза меньше:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Дж/м}^3 = 1/9,81 \text{ мм вод. ст.} = 0,102 \text{ мм вод. ст.}$$

Энергия, сообщаемая потоку в вентиляторе, вычисленная как разность энергий потока в выходном и входном патрубках вентилятора, называется полезной энергией. Относя полезную энергию к единице времени, получим полезную мощность $N_{\text{п}}$. Иными словами, полезной мощностью $N_{\text{п}}$ называется приращение энергии, получаемое всем потоком газа в вентиляторе в единицу времени (1 с).

Если вентилятор обеспечивает массовый расход газа M , кг/с, и сообщает каждому килограмму газа энергию H , Дж/кг, то полезную мощность можно представить как

$$N_{\text{п}} = \frac{M \cdot H}{1000}, \text{ кВт.} \quad (1.6)$$

Мощность $N_{\text{в}}$, передаваемая двигателем к валу вентилятора, называется *мощностью на валу вентилятора*. Энергия, передаваемая вентилятором потоку, очевидно, будет меньше энергии, передаваемой двигателем валу вентилятора, на величину потерь энергии в вентиляторе (механическое трение, потери в окружающую среду).

Эффективность использования энергии вентилятором оценивают полным КПД вентилятора η , который определяется как отношение полезной мощности к мощности на валу вентилятора:

$$\eta = N_{\text{п}} / N_{\text{в}}. \quad (1.7)$$

Описание экспериментальной установки

Опытная установка (рис. 1.1) включает следующие основные элементы: 1 – корпус; 2 – столешница; 3 – автоматический выключатель; 4 – индикаторы; 5 – датчик статического давления; 6 – датчик динамического давления; 7 – трубка измерения статического давления; 8 – трубка и штуцер измерения динамического давления; 9 – панель управления вентилятором М1; 10 – панель управления вентилятором

M2; 11 – разъем подключения вентилятора M1; 12 – вентилятор M1; 13 – тахогенератор вентилятора M1; 14 – разъем подключения вентилятора M2; 15 – вентилятор M2; 16 – тахогенератор вентилятора M2; 17 – воздуховоды; 18 – измерительный участок.

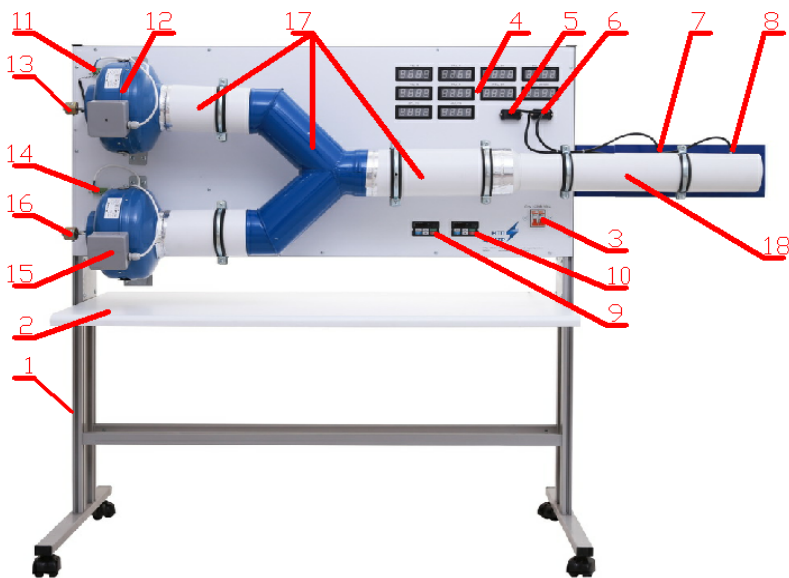


Рис. 1.1. Принципиальная схема экспериментальной установки

Порядок проведения работы

1. Проверить показания датчиков давления (воздушный поток отсутствует, вентиляторы выключены) – показания датчиков давления не должны отличаться от нуля более чем на 2Па;

2. Включить один из вентиляторов на номинальное напряжение, проверить показания датчиков давления (при этом выходной патрубок воздушного канала должен быть свободен, диафрагмы сняты).

3. С помощью ваттметра снимают потребляемую электродвигателем мощность N . Датчиками определяют статический и динамический напор в напорном трубопроводе.

4. С помощью дроссельного устройства (смена диафрагм) дросселируют поток воздуха в напорном трубопроводе и снимают пока-

зания приборов при том же числе оборотов вентилятора до полного закрытия трубопровода (холостой ход). Затем опыт повторяют при другой частоте вращения.

5. Показания приборов для всех режимов работы записывают в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

№ п/п	Опытные данные				Рассчитанные данные				
	n , об/мин	$P_{ст}$, Па	$P_{д}$, Па	N , Вт	$C_{ос}$, м/с	$C_{ср}$, м/с	Q , м ³ /с	η , %	$P_{п}$, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.1									
1.2									
1.3									
1.4									
1.5									
1.1									
1.2									
1.3									
1.4									
1.5									
1.1									
1.2									
1.3									
1.4									
1.5									

Обработка опытных данных

1. Скорость движения потока на оси напорного трубопровода определяется по формуле

$$C_{ос} = \sqrt{\frac{2P_{д}}{\rho}}, \text{ м/с,}$$

где ρ – плотность воздуха при 20 °С и $\varphi = 50$ %, $\rho = 1,2$ кг/м³;

$P_{д}$ – динамическое давление, Дж/м³, Па.

Определяется средняя скорость движения потока в напорном трубопроводе:

$$C_{\text{cp}} = 0,8 \cdot C_{\text{ос}}, \text{ м/с.}$$

2. Расход (производительность вентилятора) рассчитывается по формуле

$$Q = C_{\text{cp}} \cdot F, \text{ м}^3/\text{с},$$

где F – площадь поперечного сечения трубопровода: $D = 10$ см.

3. Полный коэффициент полезного действия вентилятора:

$$\eta = \frac{N_{\text{п}}}{N_{\text{в}}} = \frac{Q \cdot P_{\text{п}}}{N} \cdot 100 \%,$$

где $P_{\text{п}}$ – полное давление, создаваемое вентилятором, Дж/м³, Па;

N – мощность, потребляемая вентилятором (электродвигателем), Вт.

4. Все рассчитанные данные вносятся в таблицу 1.1.

5. На основании опытных и расчетных данных строится универсальная характеристика центробежного вентилятора $P_{\text{п}} = \sigma(Q)$; $N = \varphi(Q)$; $\eta = \psi(Q)$.

Контрольные вопросы

1. С какой целью производится испытание гидравлических машин?
2. Что называется индивидуальной характеристикой центробежного вентилятора?
3. Что называется универсальной характеристикой вентилятора?
4. Что называется производительностью вентилятора и от чего она зависит? Связь между массовой и объемной производительностью.
5. Как определить КПД вентилятора?
6. Что такое полезная мощность вентилятора и как она определяется?
7. Какая связь между напором и давлением, создаваемым нагнетателем?
8. Порядок проведения работы.

Лабораторная работа № 2

СНЯТИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА

Цель работы: снятие универсальной характеристики осевого вентилятора.

Общие сведения

Аналогично центробежным машинам характеристики осевых машин выражают зависимость давления (напора), мощности на валу и КПД от производительности. Характеристики получают путем испытания осевого вентилятора при различных частотах вращения.

Форма характеристики определяется конструкцией и аэродинамическими свойствами вентилятора. В отличие от центробежных машин характеристики давления (напора) осевой машины часто имеют седлообразную форму (рис. 2.1), однако у машин повышенного давления встречается падающая форма этой характеристики.

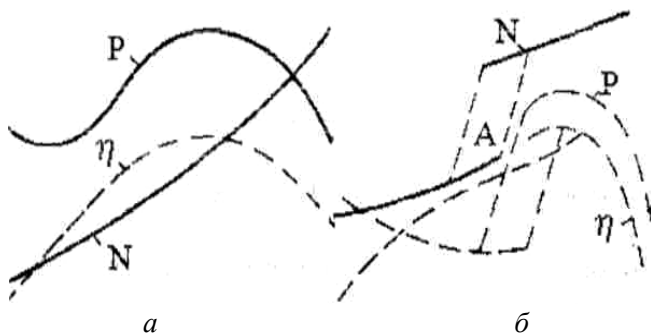


Рис. 2.1. Формы характеристик

Форма характеристик осевых машин существенно зависит от относительного диаметра втулки, углов изгиба профилей и углов их установки. У низконапорных машин с малым относительным диаметром втулки и малыми углами установки рабочих лопастей мощность холостого хода (при $Q = 0$) оказывается существенно больше,

чем на расчетном режиме (рис. 2.1, а). Дело в том, что при больших углах атаки происходит отрыв потока от лопастей, это вызывает резкое возрастание коэффициента лобового сопротивления и, как следствие, возрастание момента на валу. Характеристики высоконапорных вентиляторов могут иметь разрыв и, кроме того, крутую кривую (рабочую) ветвь (рис. 2.1, б); в эксплуатации такие характеристики оказываются неблагоприятными.

Описание экспериментальной установки

Опытная установка (рис. 2.2) включает следующие основные элементы: 1 – корпус; 2 – столешница; 3 – автоматический выключатель; 4 – индикаторы; 5 – датчик статического давления; 6 – датчик динамического давления; 7 – трубка измерения статического давления; 8 – трубка и штуцер измерения динамического давления; 9 – панель управления вентилятором М1; 10 – панель управления вентилятором М2; 11 – разъем подключения вентилятора М1; 12 – вентилятор М1; 13 – разъем подключения вентилятора М2; 14 – вентилятор М2; 15 – воздушные входы; 16 – измерительный участок.

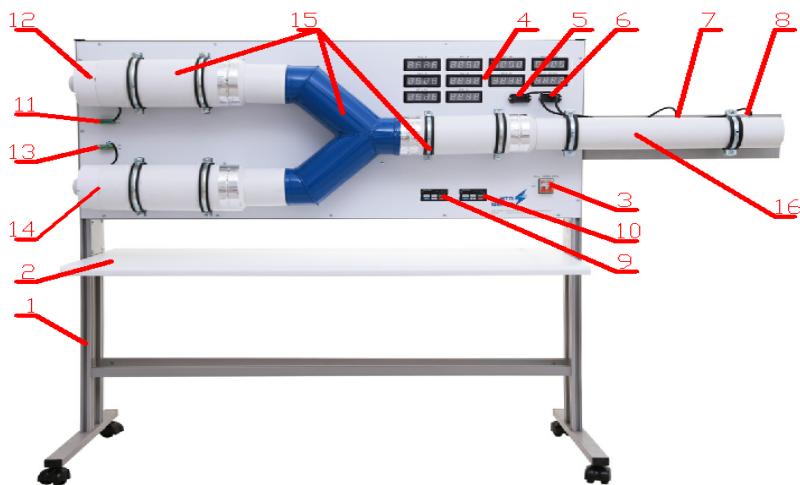


Рис. 2.2. Принципиальная схема экспериментальной установки

Порядок проведения работы

1. Проверить показания датчиков давления (воздушный поток отсутствует, вентиляторы выключены) – показания датчиков давления не должны отличаться от нуля более чем на 2Па;

2. Включить один из вентиляторов на номинальное напряжение, проверить показания датчиков давления (при этом выходной патрубок воздушного канала должен быть свободен, диафрагмы сняты).

3. С помощью ваттметра снимают потребляемую электродвигателем мощность N . Датчиками определяют статический и динамический напор в напорном трубопроводе.

4. С помощью дроссельного устройства (смена диафрагм) дросселируют поток воздуха в напорном трубопроводе и снимают показания приборов при том же числе оборотов вентилятора до полного закрытия трубопровода (холостой ход). Затем опыт повторяют при другой частоте вращения.

5. Показания приборов для всех режимов работы записывают в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

№ п/п	Опытные данные				Рассчитанные данные				
	n , об/мин	$P_{ст}$, Па	$P_{д}$, Па	N , Вт	$C_{ос}$, м/с	$C_{ср}$, м/с	Q , м ³ /с	$P_{п}$, Па	η , %
1.1									
1.2									
1.3									
1.4									
1.5									
1.1									
1.2									
1.3									
1.4									
1.5									

Обработка опытных данных

1. Расход (производительность вентилятора) рассчитывается по формуле

$$Q = C_{\text{cp}} \cdot F, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.1)$$

где F – площадь поперечного сечения трубопровода: $D = 10$ см;

C_{cp} – средняя скорость движения потока в напорном трубопроводе, равная:

$$C_{\text{cp}} = 0,5 \cdot C_{\text{oc}}, \text{ м/с}, \quad (2.2)$$

где C_{oc} – скорость движения потока на оси напорного трубопровода, определяемая по выражению

$$C_{\text{oc}} = \sqrt{\frac{2P_{\text{д}}}{\rho}}, \text{ м/с}. \quad (2.3)$$

2. Полный коэффициент полезного действия вентилятора определяется из выражения

$$\eta = \frac{Q \cdot P_{\text{п}}}{N} \cdot 100 \%. \quad (2.4)$$

3. Все рассчитанные данные вносятся в таблицу 2.1.

4. На основании опытных и расчетных данных строится универсальная характеристика центробежного вентилятора: $P_{\text{п}} = \sigma(Q)$; $N = \varphi(Q)$; $\eta = \psi(Q)$.

5. Универсальная характеристика осевого вентилятора сравнивается с универсальной характеристикой центробежного вентилятора, полученной в лабораторной работе № 1.

Контрольные вопросы

1. Что называется универсальной характеристикой осевого вентилятора?

2. От чего зависит форма характеристик осевых машин?

3. В чем состоит общая методика определения характеристик гидравлических машин?
4. В чем отличие универсальных характеристик осевого вентилятора от характеристик центробежного вентилятора?
5. Порядок проведения работы.

Лабораторная работа № 3

СНЯТИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Цель работы: снятие рабочих характеристик центробежного насоса при заданном постоянном числе оборотов рабочего колеса.

Общие сведения

Рабочими характеристиками центробежного насоса называются графические изображения зависимостей развиваемого напора H , потребляемой мощности N и полного КПД насоса. Общий вид рабочих характеристик насоса показан на рисунке 3.1.

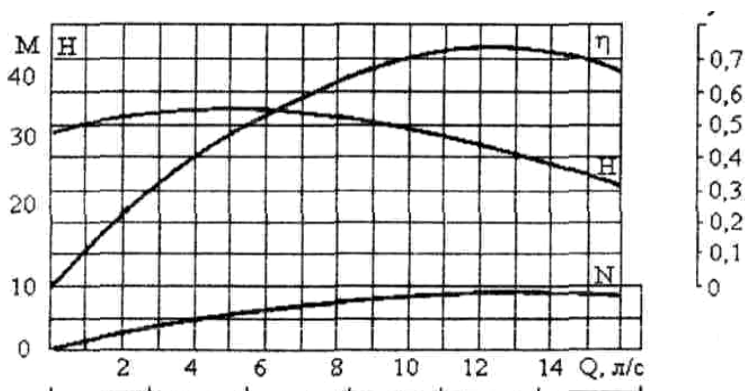


Рис. 3.1. Зависимость η от его подачи (производительности) Q при постоянной частоте вращения n

Подачей насоса Q называется количество жидкости (объемное или массовое), подаваемое им в единицу времени. Производитель-

ность обычно измеряют в м³/с или кг/с. Давлением насоса называют величину P , определяемую зависимостью

$$P = P_{\text{к}} - P_{\text{н}} + \rho \cdot \frac{C_{\text{к}}^2 - C_{\text{н}}^2}{2} + \rho \cdot g \cdot (Z_{\text{к}} - Z_{\text{н}}), \quad (3.1)$$

где $P_{\text{к}}$ и $P_{\text{н}}$ – соответственно давление на входе (конечное) и на входе (начальное), Па;

ρ – плотность жидкости, подаваемой насосом, кг/м³;

$C_{\text{к}}$ и $C_{\text{н}}$ – скорости среды на выходе и входе в насос, м/с;

$Z_{\text{к}}$ и $Z_{\text{н}}$ – высоты расположения центров тяжести выходного и входного сечений насоса, м (рис. 3.2).

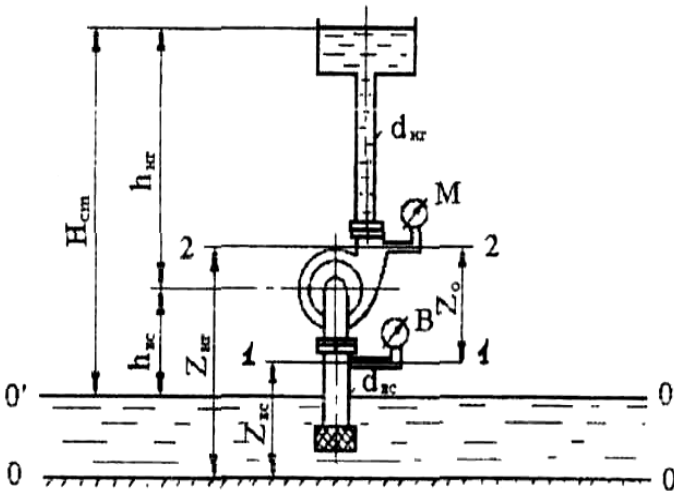


Рис. 3.2. Схема расположения насоса

Давление и напор, развиваемый насосом, определяют в соответствии с равенством

$$P = \rho \cdot g \cdot H. \quad (3.2)$$

Напор имеет линейную размерность, м (метры), и физически представляет собой высоту столба той жидкости, к потоку которой он относится.

Величина напора, применительно к схеме на рисунке 3.2, может быть определена из выражения

$$H = h_{\text{вак}} + h_{\text{ман}} + Z_0 + \frac{C_{\text{нг}}^2 - C_{\text{вс}}^2}{2g}, \quad (3.3)$$

где $h_{\text{вак}}$ – показание вакуумметра «В», присоединенного к всасывающему патрубку насоса, выраженное в метрах столба перекачиваемой жидкости;

$h_{\text{ман}}$ – показание манометра «М», присоединенного к нагнетательному патрубку насоса, также выраженное в метрах столба перекачиваемой жидкости;

Z_0 – вертикальное расстояние в метрах между точками подключения манометра и вакуумметра.

Если диаметры всасывающего и нагнетательного патрубков одинаковы

$$\frac{C_{\text{нг}}^2 - C_{\text{вс}}^2}{2g},$$

($d_{\text{вс}} = d_{\text{нг}}$) или скоростные напоры $C_{\text{вс}}^2/2g$ и $C_{\text{нг}}^2/2g$ малы по сравнению с напором H , развиваемым насосом, то членом можно пренебречь, тогда

$$H = H_{\text{вак}} + H_{\text{ман}} + Z_0. \quad (3.4)$$

Полезной мощностью $N_{\text{п}}$ называется приращение энергии, получаемое всем потоком жидкости в насосе в единицу времени (1 с):

$$N_{\text{п}} = \frac{P \cdot Q}{1000} = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{1000}, \text{ кВт}, \quad (3.5)$$

где P – давление, Па;

Q – подача, м³/с;

H – напор, м.

Потребляемой мощностью N является мощность на валу. Часть ее затрачивается на создание полезной (гидравлической) мощности $N_{\text{п}}$, а другая – на преодоление механического трения в подшипниках и сальниках, а также трения наружной поверхности рабочего колеса о жидкость.

Мощность на валу (потребляемая насосом мощность) может быть определена по формуле

$$N = \eta_{\text{двиг}} \cdot N_{\text{эл}}, \quad (3.6)$$

где $\eta_{\text{двиг}}$ – КПД электродвигателя, определяемый по графику зависимости от нагрузки электродвигателя;

$N_{\text{эл}}$ – мощность, потребляемая электродвигателем и определяемая ваттметром или по показаниям вольтметра и амперметра по формуле

$$N_{\text{эл}} = \frac{U \cdot I}{1000}, \text{ кВт.} \quad (3.7)$$

Полный коэффициент полезного действия насоса η представляет собой отношение полезной мощности $N_{\text{п}}$ к потребляемой N , т. е.

$$\eta = N_{\text{п}} / N. \quad (3.8)$$

Рабочие характеристики насоса, полученные для определенного числа оборотов n , могут быть пересчитаны на любое другое число оборотов n_1 по формулам подобия:

$$\begin{aligned} Q / Q_1 &= n / n_1; \\ H / H_1 &= (n / n_1)^2; \\ N / N_1 &= (n / n_1)^3. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Эти зависимости с достаточной степенью точности совпадают с опытными данными лишь при нормальных режимах работы насоса, т. е. в области оптимальных значений его КПД.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 3.3) включает следующие основные элементы: центробежный насос 3, электродвигатель 6, всасывающий 16 и напорный 8 трубопроводы, напорный бак 7, термостат 17, сливную трубу 4. На всасывающем и нагнетательном трубопроводе установлены регулирующие вентили 2 и 11. Расход воды через насос определяется с помощью дроссельной шайбы 10 и дифференциального манометра 13 по тарировочной кривой (рис. 3.4). Залив насоса осуществляется с помощью насоса термостата 14. На всасывающем трубопроводе установлен пружинный вакуумметр 12, а на напорном – пружинный манометр 9. Для измерения числа оборотов рабочего колеса насоса используется электронный цифровой тахометр.

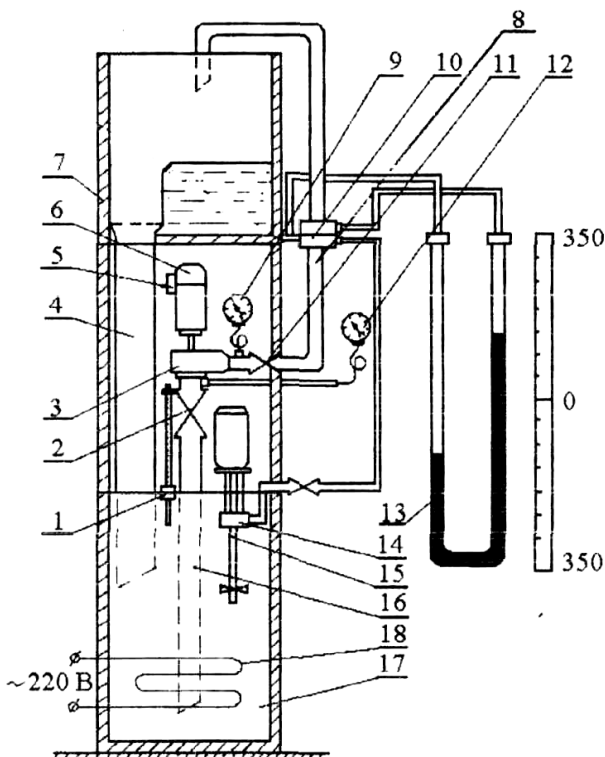


Рис. 3.3. Принципиальная схема экспериментальной установки

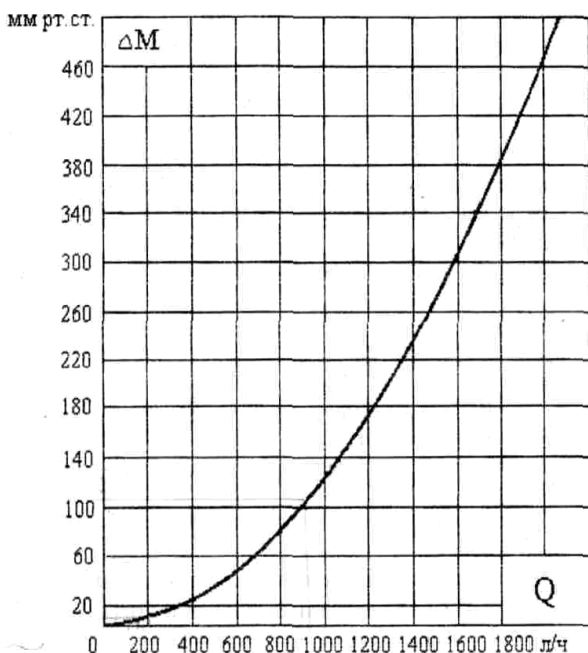


Рис. 3.4. Тарировочная кривая дифференциального манометра

Порядок проведения работы

1. Насос заливают водой из термостата с помощью насоса для залива 14 (см. рис. 3.3).

2. Включают насос. Во избежание большого пускового момента включение насоса производится при закрытой регулирующей задвижке 11.

3. При закрытой задвижке 11 снимают показания дифференциального манометра 13, пружинного вакуумметра 12, пружинного манометра 9, тахометра и ваттметра (вольтметра и амперметра).

4. Путем частичного открытия регулирующей задвижки 11 последовательно устанавливают несколько (до 8–10) новых режимов работы насоса так, чтобы более или менее равномерно охватить весь диапазон возможного изменения подачи (от $Q = 0$ до $Q_{\text{тах}}$). При каждом режиме работы насоса снимают показания приборов, перечисленных в п. 3. Все данные замеров вносят в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

Номер опыта	Показания дифференциального манометра h , мм рт. ст.	Производительность насоса Q , м ³ /с	Определение напора, развиваемого насосом			Полезная мощность N_n по формуле (3.5), кВт	Определение мощности на валу насоса			
			Показания вакуумметра	Показания манометра			Мощность электродвигателя $N_{эл}$ по формуле (3.7), кВт	КПД электродвигателя η	Мощность на валу насоса N по формуле (3.6), кВт	КПД насоса η по формуле (3.8)
			$P_{\text{вак}}$, кгс/см ² Па	$h_{\text{вак}}$, мм вод. ст.	$P_{\text{мань}}$, кгс/см ² Па	$h_{\text{мань}}$, мм вод. ст.	Напор H по формуле (3.4), м			

Обработка опытных данных

1. По показаниям дифференциального манометра H с помощью тарировочной кривой $Q = f(h)$ определяется производительность насоса.

2. Подсчитывают средние скорости, скоростные напоры и их разности в местах отбора давлений.

3. По формуле (3.4) подсчитывают напор H , развиваемый насосом.

4. По формуле (3.5) подсчитывают полезную мощность насоса.

5. По формуле (3.6) подсчитывают мощность N на валу насоса.

6. По формуле (3.8) подсчитывают полный КПД насоса η .

7. По полученным результатам вычислений, соответствующим замеренному числу оборотов n , строятся рабочие характеристики насоса в строго выдержанных масштабах.

При необходимости построения рабочих характеристик для иного числа оборотов Q , H и N пересчитывают по формулам (3.9).

Контрольные вопросы

1. Что называется рабочей характеристикой центробежного насоса?

2. Какой зависимостью определяется давление, создаваемое центробежным насосом?

3. Какой зависимостью определяется напор, развиваемый центробежным насосом?

4. Что такое КПД насоса и как он определяется?

5. Как пересчитываются рабочие характеристики центробежного насоса с одного числа оборотов рабочего колеса на другое?

6. Порядок проведения работы.

Лабораторная работа № 4

СНЯТИЕ КАВИТАЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Цель работы

1. Демонстрация на опытной насосной установке внешних признаков появления кавитации в центробежном насосе.
2. Снятие кавитационной характеристики центробежного насоса и определение критической вакуумметрической высоты всасывания при постоянной производительности и постоянном числе оборотов рабочего колеса.

Общие сведения

Как известно, всасывание жидкости насосом происходит под действием разности давлений на поверхности жидкости в приемном резервуаре и у входа в насос.

При падении давления у входа в рабочее колесо насоса до давления насыщенных паров, соответствующего температуре перекачиваемой жидкости, происходит интенсивное парообразование (самовскипание) жидкости, при котором возникает весьма сложный комплекс явлений, носящих название *кавитация*. Образовавшиеся пузырьки пара увлекаются движущимся потоком и переносятся в область более высокого давления, где происходит их конденсация.

При конденсации паров частицы жидкости устремляются к центру пузырьков с большой, нарастающей скоростью. В момент завершения процесса конденсации происходит соударение частиц жидкости, что вызывает местные гидравлические удары, сопровождающиеся мгновенным повышением давления. Кроме того, при конденсации происходит мгновенное местное повышение температуры.

Под действием гидравлических ударов жидкости о стенки каналов, а также под действием высокой температуры происходит местное поверхностное разрушение (эрозия) стенок канала и рабочего колеса насоса. Это является наиболее опасным следствием кавитации.

Удары частиц жидкости о стенки каналов сопровождаются шумом, треском и вибрацией всей насосной установки. К ударному действию частиц жидкости добавляются химическое воздействие на

металл кислорода воздуха, выделяющегося из жидкости при прохождении ею зоны вакуума, а также воздействия электрического характера, что вызывает коррозию металла.

Кавитация может возникнуть не только в насосах, но и в трубопроводах, а также в других устройствах, где поток жидкости подвергается сужению с дальнейшим расширением (в кранах, клапанах, вентилях, диафрагмах, распределительных золотниках и т. д.).

До наступления кавитации напор и мощность насоса практически не зависят от вакуумметрической высоты всасывания. С появлением кавитации резко снижаются производительность, напор, мощность и КПД насоса. Наблюдаются резкие частотные колебания (пульсации) давления в нагнетательной линии, ударные нагрузки, воздействующие на подшипники и другие детали насоса и вызывающие его быстрый выход из строя. Поэтому длительная работа насосной установки в кавитационных режимах недопустима.

Как указывалось выше, кавитация в насосе происходит при падении давления у входа в насос до некоторой минимальной величины. Для ее определения применяется уравнение Бернулли для сечений, взятых на свободной поверхности жидкости в приемном резервуаре (она же и плоскость сравнения) и во всасывающем патрубке насоса (сечение 1-1 на рис. 3.2):

$$\frac{P_0}{\rho} = g \cdot h_{\text{вс}} + \frac{P_{\text{вс}}}{\rho} + \frac{C_{\text{вс}}^2}{2} + g \cdot h_{\text{тр.вс}},$$

откуда

$$h_{\text{вак}} = h_{\text{вс}} + \frac{C_{\text{вс}}^2}{2g} + h_{\text{тр.вс}} - \frac{\Delta P}{\rho g}, \quad (4.1)$$

где $\Delta P = P_0 - P_{\text{атм}}$;

P_0 – абсолютное давление на поверхности жидкости в приемном резервуаре;

$h_{\text{вс}}$ – геометрическая высота всасывания;

$P_{\text{вс}}$ – абсолютное давление во всасывающем патрубке насоса;

$C_{\text{вс}}$ – средняя скорость движения жидкости во всасывающем патрубке;

$h_{\text{тр.вс}}$ – гидравлические потери во всасывающем трубопроводе.

Кавитация ограничивает высоту всасывания насоса. Высота всасывания, при которой начинается кавитация, называется *критической*. Она зависит от конструкции насоса, режима его работы, рода и температуры жидкости и от величины атмосферного давления.

При кавитационных испытаниях насоса определяется вакуумметрическая высота всасывания, при которой начинается кавитация.

Кавитационной характеристикой насоса называется зависимость напора H и мощности N от вакуумметрической высоты всасывания $h_{\text{вак}}$ при постоянной производительности насоса и постоянном числе оборотов рабочего колеса.

Общий вид кавитационной характеристики насоса показан на рисунке 4.1.

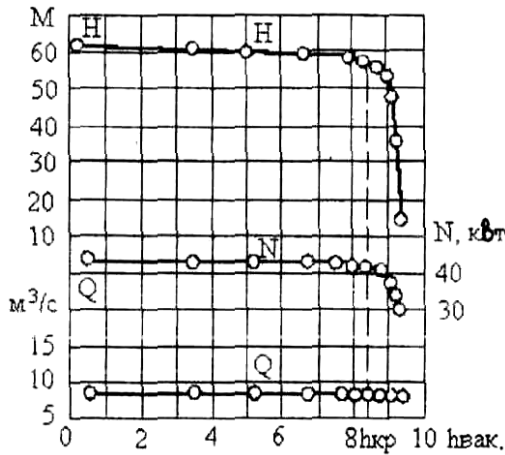


Рис. 4.1. Общий вид кавитационной характеристики насоса

Начало резкого падения кривых напора и мощности определяет максимально допустимое значение вакуумметрической высоты, которую называют *критической вакуумметрической высотой всасывания* $h_{\text{кр.вак}}$. Зная последнюю, можно по зависимости (4.1) определить предельную допустимую высоту всасывания:

$$h_{\text{доп.вс}} = h_{\text{кр.вак}} - \frac{C_{\text{вс}}^2}{2g} - h_{\text{тр.вс}} + \frac{\Delta P}{\rho g}. \quad (4.2)$$

Если на поверхности жидкости в приемном резервуаре $P_0 = P_{\text{атм}}$, то в выражениях (4.1) и (4.2) $\Delta P = 0$.

Описание экспериментальной установки

Снятие кавитационной характеристики центробежного насоса производится на опытной установке открытого типа, описание которой приведено в лабораторной работе № 3 (см. рис. 3.3).

Для изменения давления у входа в насос на всасывающем трубопроводе установлена регулирующая задвижка 2, при различном открытии которой изменяется вакуум во всасывающем патрубке насоса.

Порядок проведения работы

1. Заливают насос водой из термостата с помощью насоса для залива, для чего на короткое время открывают регулирующую задвижку 11.

2. Включают насос. Во избежание большого пускового момента включение насоса производится при закрытой задвижке 11.

3. При помощи задвижки 11 на нагнетательном трубопроводе устанавливают некоторую подачу насоса, при которой и определяется критическая высота всасывания, соответствующая началу процесса кавитации.

4. Снимают показания дифференциального манометра, ваттметра, пружинного вакуумметра, пружинного манометра и тахометра.

5. Прикрывая задвижку 2 на всасывающем трубопроводе, устанавливают новый вакуум у входа в насос. Так как при этом производительность насоса уменьшается, то, маневрируя задвижкой 11, восстанавливают первоначальную производительность насоса, о чем судят по показаниям дифференциального манометра. После этого снова снимают показания всех приборов, перечисленных в пункте 4.

6. Постоянная температура воды на входе в насос поддерживается термостатом; ее величина задается руководителем работ.

7. Аналогично устанавливаются новые режимы работы насоса, при которых снимаются показания всех приборов. Всего проводят 8–12 опытов. Все данные замеров вносят в таблицу (см. табл. 3.1).

Обработка опытных данных

1. По показаниям дифференциального манометра и с помощью тарировочной кривой определяют производительность насоса.
2. Подсчитывают средние скорости, скоростные напоры и их разности в местах отбора давления.
3. По формуле (3.3) подсчитывается напор H , развиваемый насосом.
4. По формуле (3.6) подсчитывают потребляемую насосом мощность (мощность на валу). Все результаты вычислений заносятся в таблицу (см. табл. 3.1).
5. По найденным значениям Q , H , N и $h_{\text{вак}}$ строятся кавитационные характеристики насоса в строго выдержанных масштабах.
6. Из кавитационной характеристики определяется критическое значение вакуумметрической высоты всасывания $h_{\text{кр.вак}}$.

Контрольные вопросы

1. Что такое явление кавитации?
2. Почему недопустима длительная работа насосной установки в кавитационном режиме?
3. Уравнение сохранения энергии (уравнение Бернулли).
4. Что такое вакуумметрическая высота всасывания, как она определяется и от чего зависит?
5. Порядок проведения работы.

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ, ИМЕЮЩИХ ОДИНАКОВЫЕ РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Цель работы: исследование последовательной работы двух центробежных вентиляторов, имеющих одинаковые рабочие характеристики.

Общие сведения

На практике часто встречаются случаи совместной работы машин на общую сеть. Каждый конденсатор паровой турбины обслуживается двумя параллельно включенными конденсатными насосами, а питательные насосы включаются последовательно с конденсатными. В топку парогенератора воздух подается параллельно включенными дутьевыми вентиляторами; два дымососа включены последовательно с вентиляторами. Большинство насосных установок выполняется в виде ряда насосов, включенных в сеть параллельно.

Вообще увеличение количества рабочих агрегатов позволяет уменьшать аварийный резерв установки и при благоприятной форме характеристики $P = f(Q)$ обеспечивает энергетически эффективную эксплуатацию. Очевидно, что правильный выбор машин для совместной работы и правильная их эксплуатация невозможны без исследования совместной работы машин. Последовательное включение вентиляторов производится с целью увеличения давления.

Для проведения анализа совместной работы последовательно включенных центробежных вентиляторов необходимо построить их суммарную характеристику. Эта характеристика получается путем алгебраического сложения полных давлений каждого вентилятора при одинаковой их производительности. На рис. 5.1, *a* показаны характеристики $P = f(Q)$ для двух различных вентиляторов, включенных последовательно (P_1 – характеристика первого вентилятора, P_2 – характеристика второго вентилятора и P_{Σ} – суммарная характеристика вентиляторов).

Из рисунка 5.1, *a* следует, что совместная работа вентиляторов на сеть I явно нерациональна: общая производительность двух вен-

тиляторов Q меньше производительности первого вентилятора Q_1 при раздельной работе ее на ту же сеть. Происходит это потому, что первому вентилятору приходится преодолевать сопротивление не только сети, но и второго вентилятора, который работает как дроссель ($P_2 < 0$).

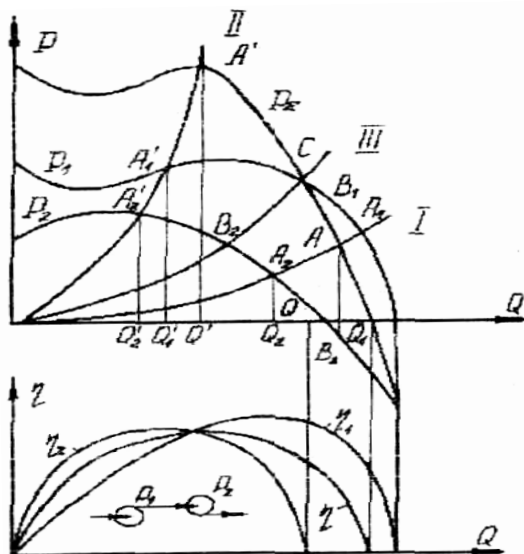


Рис. 5.1. Характеристики для двух различных вентиляторов

При совместной работе вентиляторов на сеть с крутой характеристикой II общая производительность значительно больше, чем производительность каждого из вентиляторов при раздельной работе на ту же сеть (Q_1' и Q_2'), что говорит о целесообразности совместной работы в этом случае.

Вопрос о целесообразности совместной работы вентиляторов следует решать не только с учетом увеличения подачи, но и в зависимости от КПД вентиляторов (при совместной работе). Поэтому кроме суммарной характеристики $P-Q$ необходимо построить суммарную характеристику $\eta(Q)$ (рис. 5.1, б), которая позволяет решить вопрос о целесообразности и экономичности совместной работы вентиляторов при последовательном включении. Наиболее экономичной работа вентиляторов при последовательном включении бу-

дет в том случае, если каждая машина при требуемой суммарной производительности будет работать в режиме максимального КПД. При совместной работе нескольких машин суммарная характеристика строится так же, как и для двух машин; давление складывается при равных расходах, а сумма КПД – по выражению

$$\eta = \frac{\sum P_i}{\sum \frac{P_i}{\eta_i}}$$

Описание экспериментальной установки

Опытная установка (рис. 5.2) включает следующие основные элементы: 1 – корпус; 2 – столешница; 3 – автоматический выключатель; 4 – индикаторы; 5 – датчик статического давления; 6 – датчик динамического давления; 7 – трубка измерения статического давления; 8 – трубка и штуцер измерения динамического давления; 9 – панель управления вентилятором М1; 10 – панель управления вентилятором М2; 11 – разъем подключения вентилятора М1; 12 – вентилятор М1; 13 – тахогенератор вентилятора М1; 14 – разъем подключения вентилятора М2; 15 – вентилятор М2; 16, 17 – воздухопроводы.

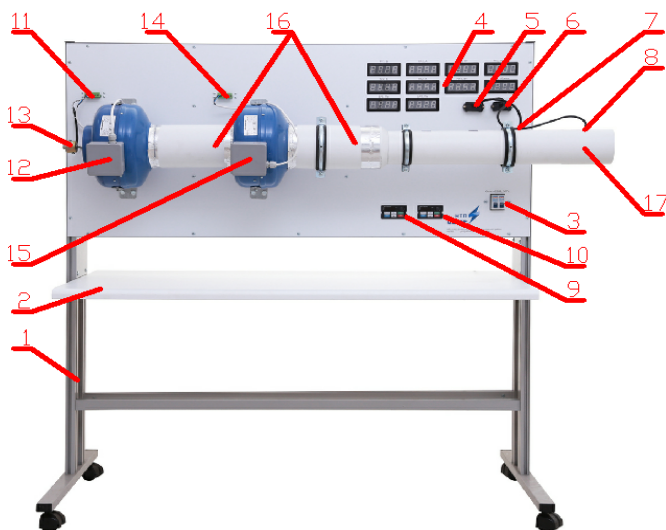


Рис. 5.2. Схема экспериментальной установки

Порядок проведения работы

1. Проверить показания датчиков давления (воздушный поток отсутствует, вентиляторы выключены) – показания датчиков давления не должны отличаться от нуля более чем на 2Па;

2. Включить один из вентиляторов на номинальное напряжение, проверить показания датчиков давления (при этом выходной патрубок воздушного канала должен быть свободен, диафрагмы сняты).

3. С помощью ваттметра снимают потребляемую электродвигателем мощность N . Датчиками определяют статический и динамический напор в напорном трубопроводе.

4. С помощью дроссельного устройства (смена диафрагм) дроселируют поток воздуха в напорном трубопроводе и снимают показания приборов при том же числе оборотов вентилятора до полного закрытия трубопровода (холостой ход). Затем опыт повторяют при другой частоте вращения.

5. Показания приборов для всех режимов работы записывают в таблицу 5.1

Таблица 5.1

№ п/п	Опытные данные				Рассчитанные данные				
	n , об/мин	$P_{\Sigma ст}$, Па	$P_{\Sigma д}$, Па	N , Вт	$C_{ос}$, м/с	$C_{ср}$, м/с	Q , м ³ /с	$P_{\Sigma п}$, Па	η , %
1.1									
1.2									
1.3									
1.4									
1.1									
1.2									
1.3									
1.4									

Обработка опытных данных

1. Определяется расход воздуха в напорном трубопроводе при различных режимах работы вентиляторов.
2. Строится суммарная напорная характеристика $P_{\Sigma n} = f(Q)$.
3. Определяется полный коэффициент полезного действия двух последовательно включенных вентиляторов, работающих в различных режимах, по выражению

$$\eta_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma n} \cdot Q}{N_1 + N_2}.$$

4. Строится зависимость $\eta_{\Sigma} = f(Q)$ для случая последовательной работы вентиляторов.
5. Все расчетные величины записывают в таблицу 5.1.
6. Сравнить, совпадает ли экспериментальная суммарная зависимость $P_{\Sigma n} = f(Q)$ с построенной для отдельной работы вентилятора (лабораторная работа № 1).

Контрольные вопросы

1. С какой целью проводится последовательное включение нагнетательных машин?
2. Примеры последовательного включения нагнетательных машин.
3. Как строится суммарная характеристика двух последовательно включенных вентиляторов, имеющих одинаковые и различные напорные характеристики?
4. В каком случае рационально последовательное включение центробежных машин?
5. Порядок проведения работы.

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ, ИМЕЮЩИХ РАЗЛИЧНЫЕ РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Цель работы: исследование параллельной работы двух параллельно включенных вентиляторов, имеющих различные рабочие характеристики.

Общие сведения

Целью работы является экспериментальное определение рабочей характеристики двух параллельно работающих центробежных вентиляторов, имеющих различные рабочие характеристики и изменения напорной характеристики вентилятора $P-Q$ в случае их совместной работы.

Параллельное включение вентиляторов производится для увеличения расхода.

Рассмотрим параллельную работу двух центробежных вентиляторов, имеющих различные рабочие характеристики, ограничившись для простоты случаем, когда можно пренебречь сопротивлением соединительных участков трубопроводов MN и KN (рис. 6.1).

Вентилятор 1 имеет рабочее колесо с лопатками, загнутыми вперед ($\beta_{2л} > 90^\circ$), и напорную характеристику P_1 . Вентилятор 2 имеет рабочее колесо с лопатками, загнутыми назад ($\beta_{2л} < 90^\circ$), и напорную характеристику P_2 . Угол $\beta_{2л}$ – это угол между касательной к лопатке на выходе из рабочего колеса и отрицательным направлением окружной скорости. При построении суммарной характеристики необходимо учесть, что:

а) напор (давление), развиваемый при совместной работе всегда одинаков ($P_1 = P_2 = P_\Sigma$);

б) подача при работе обеих машин равна сумме подач машин при их совместной работе ($Q_1 + Q_2 = Q_\Sigma$).

Сложение характеристик вентиляторов производится одинаково до тех пор, пока подача положительна. Если в вентиляторе есть обратный клапан, то отрицательной подачи (т. е. обратного течения воздуха через вентилятор) быть не может. Поэтому, начиная с дав-

ления, при котором подача одного из вентиляторов достигла нуля (точка d_2), суммарная характеристика совпадает с характеристикой первого вентилятора ($d_2 \rightarrow d_1 \rightarrow \beta_1$).

При крутой характеристике сети III совместная работа вентиляторов явно не целесообразна; подача первого вентилятора при раздельной работе больше, чем общая подача при совместной работе. Чтобы установить причину этого, проведем через точку А пересечения суммарной характеристики вентиляторов и характеристики сети III горизонтальную линию, пересекающую характеристики вентиляторов в точках B_1 и B_2 . Эти точки определяют режимы работы вентиляторов при их совместной работе на сеть III. Отрицательное значение подачи второго вентилятора означает, что воздух движется через вентилятор в обратном направлении, этим и объясняется уменьшение суммарной подачи.

Из рисунка 6.1. видно, что совместная работа вентиляторов при параллельном включении имеет смысл при характеристике сети более пологой, чем для сети II, проходящей через точку пересечения суммарной характеристики и характеристики первого вентилятора. Необходимо отметить также полезную особенность совместной работе вентиляторов при параллельном включении. При отключении одного из вентиляторов режим работы второго вентилятора смещается в область больших подач. Если при совместной работе двух вентиляторов на сеть I суммарная подача равна Q , режим работы первого вентилятора характеризуется точкой B_1 , то при отключении второго вентилятора режим работы первого из точки B_1 переходит в точку A_1 , его подача возрастает до Q'_1 , суммарный КПД установки (рис. 6.1, б)

$$\eta_{\Sigma} = \frac{Q_1 + Q_2}{\frac{Q_1}{\eta_1} + \frac{Q_2}{\eta_2}}$$

Таким образом, если вентиляторы при параллельном включении должны обеспечить подачу Q и давление P , то желательно, чтобы давление P соответствовало режиму максимального КПД каждого вентилятора, а суммарная подача вентиляторов при давлении P равнялась требуемой подаче.

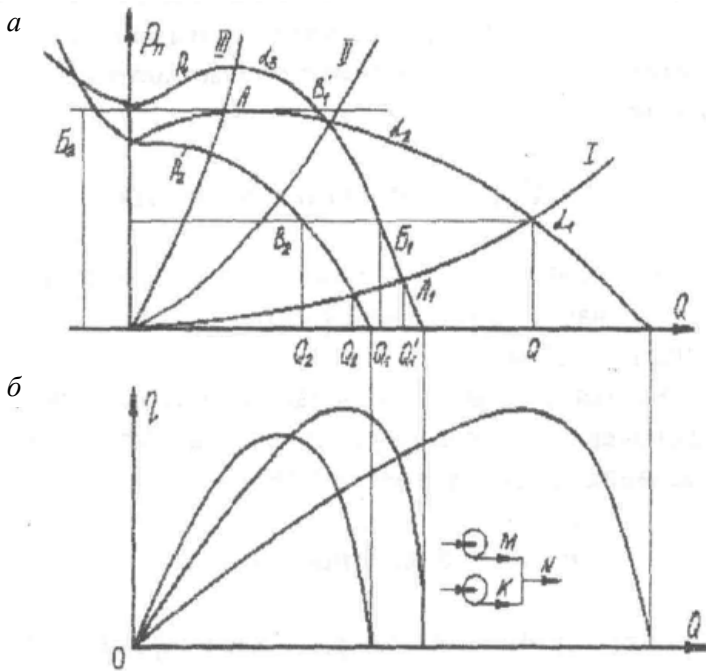


Рис. 6.1. Характеристики совместной работы вентиляторов

Описание экспериментальной установки

Опытная установка (рис. 6.2) включает следующие основные элементы: 1 – корпус; 2 – столешница; 3 – автоматический выключатель; 4 – индикаторы; 5 – датчик статического давления; 6 – датчик динамического давления; 7 – трубка измерения статического давления; 8 – трубка и штуцер измерения динамического давления; 9 – панель управления вентилятором М1; 10 – панель управления вентилятором М2; 11 – разъем подключения вентилятора М1; 12 – вентилятор М1; 13 – тахогенератор вентилятора М1; 14 – разъем подключения вентилятора М2; 15 – вентилятор М2; 16 – тахогенератор вентилятора М2; 17 – воздуховоды; 18 – измерительный участок.

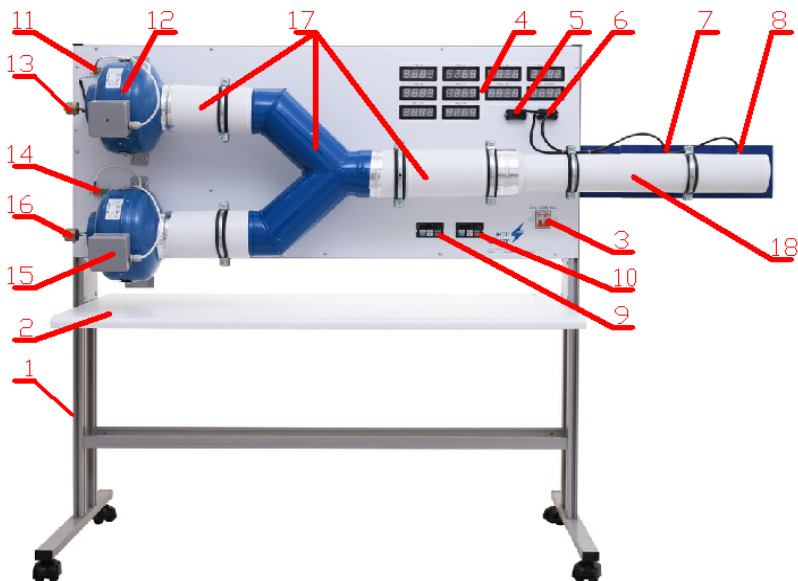


Рис. 6.2. Схема экспериментальной установки

Порядок проведения работы

1. Проверить показания датчиков давления (воздушный поток отсутствует, вентиляторы выключены) – показания датчиков давления не должны отличаться от нуля более чем на 2 Па;

2. Включить один из вентиляторов на номинальное напряжение, проверить показания датчиков давления (при этом выходной патрубок воздушного канала должен быть свободен, диафрагмы сняты).

3. С помощью ваттметра снимают потребляемую электродвигателем мощность N . Датчиками определяют статический и динамический напор в напорном трубопроводе.

4. С помощью дроссельного устройства (смена диафрагм) дросселируют поток воздуха в напорном трубопроводе и снимают показания приборов при том же числе оборотов вентилятора до полного закрытия трубопровода (холостой ход). Затем опыт повторяют при другой частоте вращения.

5. Показания приборов для всех режимов работы записывают в таблицу 6.1.

Таблица 6.1

№ п/п	Опытные данные				Расчетные данные				
	n , об/мин	$P_{\Sigma ст}$, Па	$P_{\Sigma д}$, Па	N , Вт	$C_{ос}$, м/с	$C_{ср}$, м/с	Q , м ³ /с	η , %	$P_{\Sigma п}$, Па
1.1									
1.2									
1.3									
1.4									
1.5									
1.1									
1.2									
1.3									
1.4									
1.5									
1.1									
1.2									
1.3									
1.4									
1.5									

Обработка опытных данных

1. Строится суммарная напорная характеристика $P_{\Sigma п} = \delta(Q)$.
2. Определяется полный коэффициент полезного действия при совместной работе вентиляторов.
3. Строится зависимость КПД и мощности вентиляторов при совместной работе.
4. Сравнить, совпадает ли экспериментальная суммарная зависимость $P_{\Sigma п} = \delta(Q)$ с построенной для раздельной работы вентилятора (лабораторная работа № 1).

Соотношения между единицами измерения давления

Наименование единиц	Н/м ² , Па	бар	ат (техническая атмосфера)	атм (физическая атмосфера)	мм вод. ст.	мм рт. ст.
1 Н/м ² (1 Па)	1	1 · 10 ⁻⁵	1, 01972 · 10 ⁻⁵	9, 86923 · 10 ⁻⁶	0, 101972	750, 062 · 10 ⁻⁵
1 бар	10 ⁵	1	1, 01972	0, 986923	10197, 2	750, 062
1 кгс/м ² (1 мм вод. ст.)	9, 80665	9, 80665 · 10 ⁻⁵	1 · 10 ⁻⁴	9, 67841 · 10 ⁻⁵	1	73, 5559 · 10 ⁻³
1 атм	1, 01325 · 10 ⁵	1, 01325	1, 03323	1	1, 03323 · 10 ⁴	760
1 ат (1 кгс/см ²)	98, 0665 · 10 ³	0, 980665	1	0, 967841	10 ⁴	735, 559
1 мм рт. ст.	133, 322	68, 9476 · 10 ⁻³	1, 35951 · 10 ⁻³	1, 31579 · 10 ⁻³	13, 5951	1

Контрольные вопросы

1. С какой целью производится параллельное включение нагнетательных машин?
2. Примеры параллельного включения нагнетательных машин.
3. Как строится суммарная характеристика двух параллельно включенных центробежных вентиляторов, имеющих одинаковые и различные напорные характеристики?
4. В каком случае рационально параллельное включение центробежных машин?
5. Как определяется суммарный коэффициент полезного действия нескольких параллельно включенных центробежных машин?
6. Порядок проведения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шерстюк, А. Н. Насосы, вентиляторы, компрессоры / А. Н. Шерстюк. – М. : Высшая школа, 1992. – 267 с.
2. Черкасский, В. М. Насосы, компрессоры, вентиляторы / В. М. Черкасский, Т. М. Романова, Р. А. Кауль. – М. : Энергия, 1992. – 239 с.
3. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М. : Высшая школа, 1980. – 422 с.
4. Кадылинский, О. Е. Лабораторный практикум по теплогазоснабжению и вентиляции / О. Е. Кадылинский. – Минск : Высшая школа, 1993. – 35 с.
5. Степанов, П. Р. Лабораторный практикум по гидравлике и гидравлическим машинам (насосам) / П. Р. Степанов, Н. Г. Рыжов. – Минск : Высшая школа, 1987. – 42 с.
6. Леонков, А. М. Лабораторный практикум по паровым и газовым турбинам / А. М. Леонков, В. К. Балабанович, В. А. Золоторева. – Минск : БПИ, 1985. – 47 с.

Учебное издание

НАГНЕТАТЕЛИ И ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Лабораторный практикум
для студентов специальности 1-43 01 05
«Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»
дневной и заочной формы обучения

В 3 частях

Часть 1

*Второе издание,
исправленное и дополненное*

С о с т а в и т е л и:
АЙДАРОВА Зоя Борисовна
ЧЕРНЫШЕВИЧ Владимир Иванович
САПУН Николай Николаевич и др.

Редактор *Е. О. Германович*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 24.06.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,38. Уч.-изд. л. 1,09. Тираж 100. Заказ 823.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.