

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»
дневной и заочной формы обучения

В 3 частях

Часть 1

Минск
БНТУ
2014

УДК 621.43.031.3+621.4(076.5)(075.8)

ББК 31.36я7

Н16

Составители:

З. Б. Айдарова, В. И. Чернышевич, Н. Н. Сапун

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *Н. Б. Карницкий*;
кандидат технических наук, доцент *А. Я. Савастийенок*

Нагнетатели и тепловые двигатели : лабораторный практикум
Н16 для студентов специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» дневной и заочной формы обучения : в 3 ч. / сост.: З. Б. Айдарова, В. И. Чернышевич, Н. Н. Сапун. – Минск : БНТУ, 2014. – Ч. 1. – 2014. – 40 с.

ISBN 978-985-550-283-9 (Ч. 1).

В практикуме приведено описание лабораторных работ по одноименной дисциплине в соответствии с учебной программой для студентов специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» 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 621.43.031.3+621.4(076.5)(075.8)

ББК 31.36я7

ISBN 978-985-550-283-9 (Ч. 1)

ISBN 978-985-550-284-6

© Белорусский национальный
технический университет, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Правила техники безопасности	4
Лабораторная работа № 1 СНЯТИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ВЕНТИЛЯТОРА	5
Лабораторная работа № 2 СНЯТИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА	12
Лабораторная работа № 3 СНЯТИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА	16
Лабораторная работа № 4 СНЯТИЕ КАВИТАЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА	24
Лабораторная работа № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ, ИМЕЮЩИХ ОДИНАКОВЫЕ РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	29
Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ, ИМЕЮЩИХ РАЗЛИЧНЫЕ РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	34
Литература	40

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

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, так как удобной для практики аналитической зависимости между параметрами гидравлических машин найти пока не удается. Универсальные характеристики представляют собой совокупность индивидуальных характеристик, построенных для некоторого диапазона чисел оборотов.

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 полного давления и производительности для каждого положения регулирующего органа.

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

Объемная производительность вентилятора 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, $\text{м}/\text{с}$;

F – площадь поперечного сечения трубопровода, м^2 .

Массовый расход M измеряется в $\text{кг}/\text{с}$.

Связь между массовым расходом и объемным имеет следующий вид:

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

где ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$.

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 м^3 газа:

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

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

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

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_n . Иными словами, полезной мощностью N_n 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

$$N_n = M \cdot H, \text{ Вт,} \quad (1.6)$$

$$N_n = \frac{M \cdot H}{1000}, \text{ кВт.} \quad (1.7)$$

Мощность N_b , 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:

$$\eta = N_n / N_b. \quad (1.8)$$

Описание экспериментальной установки

Опытная установка (рисунок 1.1) включает следующие основные элементы: центробежный вентилятор 1; электродвигатель постоянного тока 4; напорный трубопровод 2; дроссельное устройство (набор диафрагм) 3; измерительную аппаратуру и блок питания. Измерительная аппаратура включает: ваттметр 10 для определения мощности, потребляемой электродвигателем; микроманометры ММН-240 8 и 9 для определения полного и динамического напора в напорном трубопроводе; преобразователь измерительный тахометрический ПИТ 6 и преобразователь первичный тахометрический ППТ 5. Блок питания включает автотрансформатор 12 и выпрямитель 11.

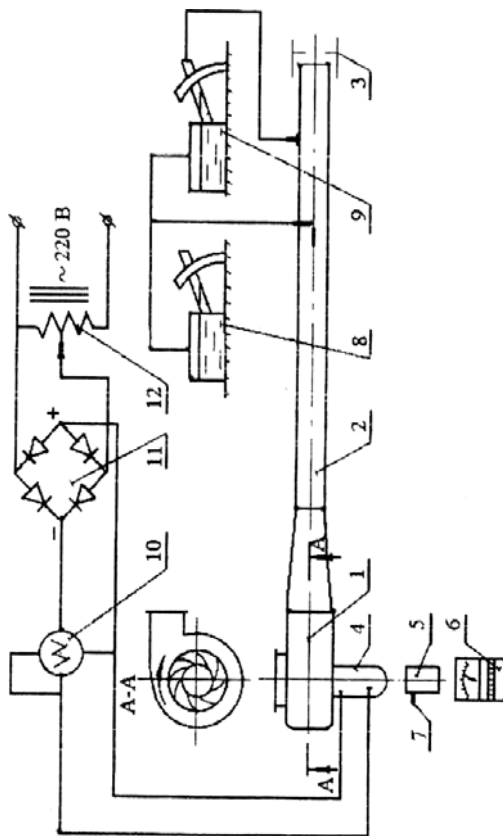


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема экспериментальной установки

Порядок проведения работы

1. Перед началом работы необходимо проверить напряжение питания батареи электронного тахометра. Для этого необходимо нажать на кнопку 7 (рисунок 1.1), расположенную на корпусе ППТ 5, и на клавишу «сброс», расположенную на лицевой стороне корпуса ПИТ 6. Стрелка измерителя должна установиться в пределах сектора, изображенного на шкале измерителя.

2. Включается блок питания.

3. Автотрансформатором 11 и тахометрами 5, 6 устанавливают число оборотов, равное 3000 об/мин, при полностью открытом напорном трубопроводе (без диафрагм).

4. С помощью ваттметра 10 снимают потребляемую электродвигателем мощность N . Микроманометрами 8 и 9 определяют полный и динамический напор в напорном трубопроводе.

5. 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 2500, 2000 и 1500 об/мин.

6. Показания приборов для всех режимов работы записывают в таблицу:

№ П/п	Опытные данные				Рассчитанные данные			
	n , об/мин	$P_{п}$, Па	$P_{д}$, Па	N , Вт	$C_{ос}$, м/с	$C_{ср}$, м/с	Q , м ³ /с	η , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.1	3000							
1.2								
1.3								
1.4								
1.5								
1.1	2500							
1.2								
1.3								
1.4								
1.5								

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.1	2000							
1.2								
1.3								
1.4								
1.5								
1.1	1500							
1.2								
1.3								
1.4								
1.5								

Обработка опытных данных

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

$$C_{oc} = \sqrt{\frac{2P_d}{\rho}}, \text{ м/с,}$$

где ρ – плотность воздуха при 20 °С и $\varphi = 50 \%$, $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$;

P_d – динамическое давление, Дж/м^3 , Па.

Средняя скорость движения потока в напорном трубопроводе

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

2. Расход (производительность вентилятора) рассчитывается по формуле

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

где F – площадь поперечного сечения трубопровода: $F = 0,0038 \text{ м}^2$.

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 ту же таблицу, что и данные, полученные опытным путем.

5. На основании опытных и расчетных данных строится на миллиметровой бумаге универсальная характеристика центробежного вентилятора $P = \sigma(Q)$; $N = \varphi(Q)$; $\eta = \psi(Q)$.

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 имеет седлообразную форму (рисунок 2.1), однако у машин повышенного давления встречается падающая форма этой характеристики.

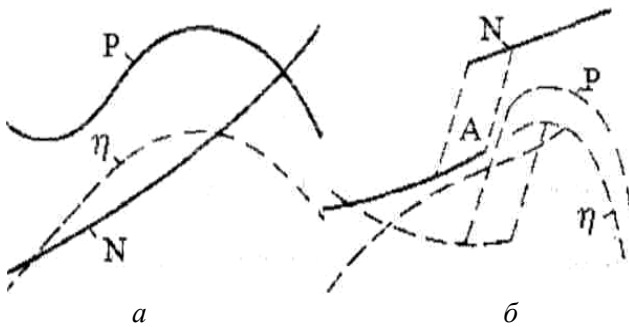


Рисунок 2.1 – Формы характеристик

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 мощ-

ность холостого хода (при $Q = 0$) оказывается существенно больше, чем на расчетном режиме (рисунок 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 (рисунок 2.1, б); в эксплуатации такие характеристики оказываются весьма неблагоприятными.

Описание экспериментальной установки

Опытная установка (рисунок 2.2) включает следующие основные элементы: осевой вентилятор 1, напорный трубопровод 2, дроссельное устройство (набор диафрагм) 3. Измерительная аппаратура включает: амперметр 8 и вольтметр 9 для определения мощности, потребляемой электродвигателем 4 вентилятора, микроманометры ММН-240 6 и 7 для определения полного и динамического напора в напорном трубопроводе, ручной тахометр 5 для определения числа оборотов вентилятора. Блок питания включает автотрансформатор 11 и выпрямитель 10.

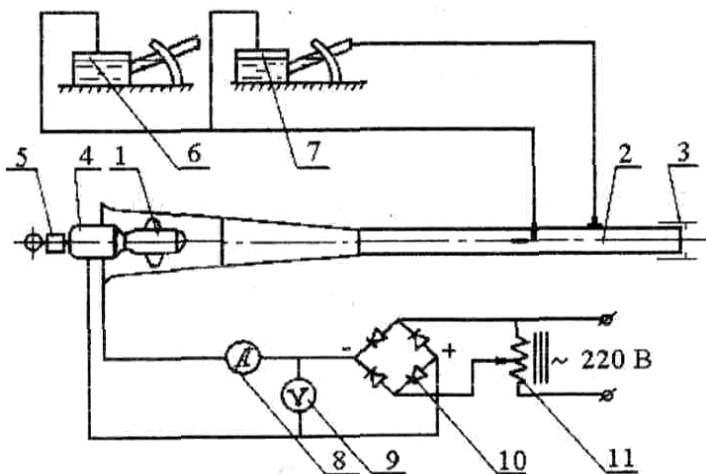


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема экспериментальной установки

Порядок проведения работы

1. Включают блок питания.

2. Автотрансформатором *11* (рисунок 2.2) устанавливают число оборотов вентилятора, равное 5000 об/мин при полностью открытом напорном трубопроводе (без диафрагм). Измерение числа оборотов вентилятора осуществляется с помощью ручного тахометра 5.

3. С помощью амперметра 8 и вольтметра 9 определяют мощность, потребляемую электродвигателем вентилятора. Микроманометры 6 и 7 измеряют полное и динамическое давление в напорном трубопроводе.

4. С помощью дроссельного устройства (сменой 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 повторяется для числа оборотов вентилятора 4000 и 3000 об/мин.

5. Показания приборов для режимов работы вентилятора записывают в таблицу:

№ п/п	Опытные данные					Рассчитанные данные				
	n , об/мин	P_n , Па	P_d , Па	I , А	U , В	$C_{ос}$, м/с	$C_{ср}$, м/с	Q , м ³ /с	N , Вт	η , %
1.1	5000									
1.2										
1.3										
1.4										
1.5										
1.1	4000									
1.2										
1.3										
1.4										
1.5										
1.1	3000									
1.2										
1.3										
1.4										
1.5										

Обработка опытных данных

1. Расход (производительность вентилятора) рассчитывается по формуле

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

где F – площадь поперечного сечения трубопровода: $F = 0,0176 \text{ м}^2$;
 C_{cp} – средняя скорость движения потока в напорном трубопроводе:

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

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 по выражению

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

3. Все рассчитанные данные вносятся в ту же таблицу, что и данные, полученные опытным путем.

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

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.

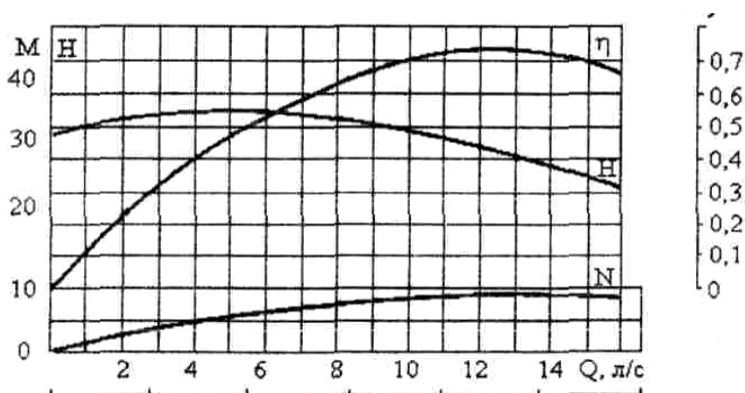


Рисунок 3.1 – Зависимость η от его подачи (производительности) Q при постоянной частоте вращения n

Подачей насоса Q называется количество жидкости (объемное или массовое), подаваемое им в единицу времени. Производительность обычно измеряют в $\text{м}^3/\text{с}$ или $\text{кг}/\text{с}$. В соответствии с ГОСТ 17398–72 «Насосы. Термины и определения» давлением насоса называют величину P , определяемую зависимостью

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

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

ρ – плотность жидкости, подаваемой насосом, $\text{кг}/\text{м}^3$;

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

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

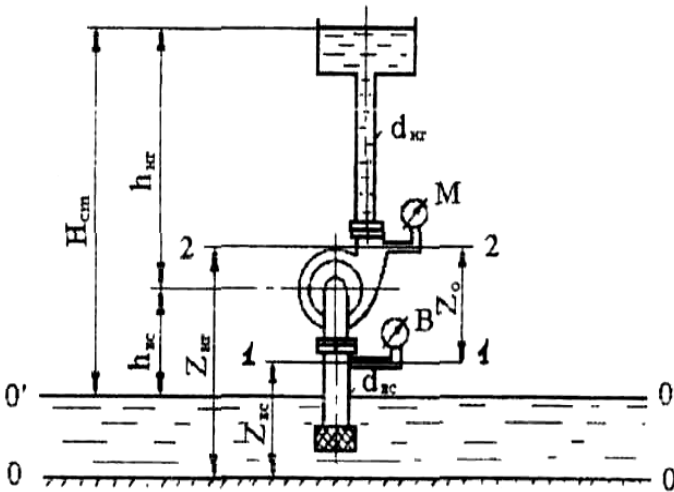


Рисунок 3.2 – Схема расположения насоса

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

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

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

Величина напора, применительно к схеме, показанной на рисунке 3.2, может быть определена по выражению

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

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 ($d_{\text{вс}} = d_{\text{нг}}$):

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

Если 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:

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

Полезной мощностью 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.

$$\eta = N_{\text{п}}/N = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{1000}. \quad (3.8)$$

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 (рисунок 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 (рисунок 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.

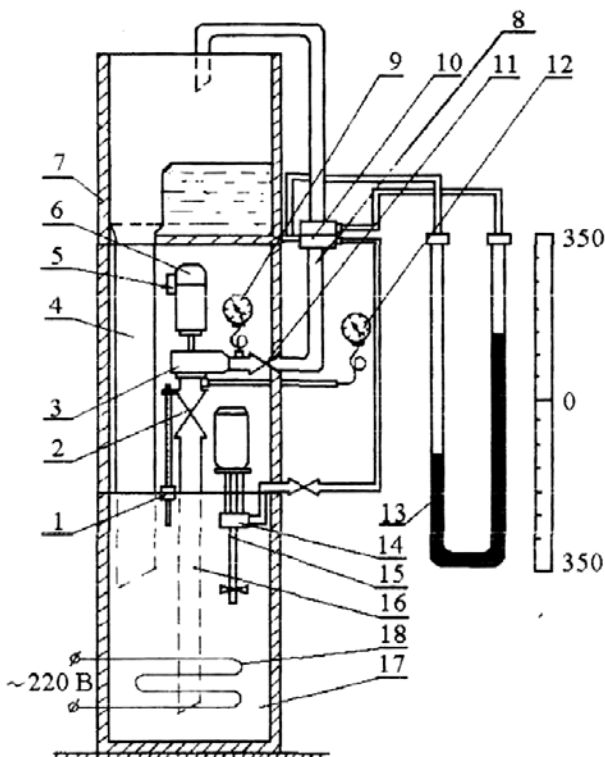


Рисунок 3.3 – Принципиальная схема экспериментальной установки

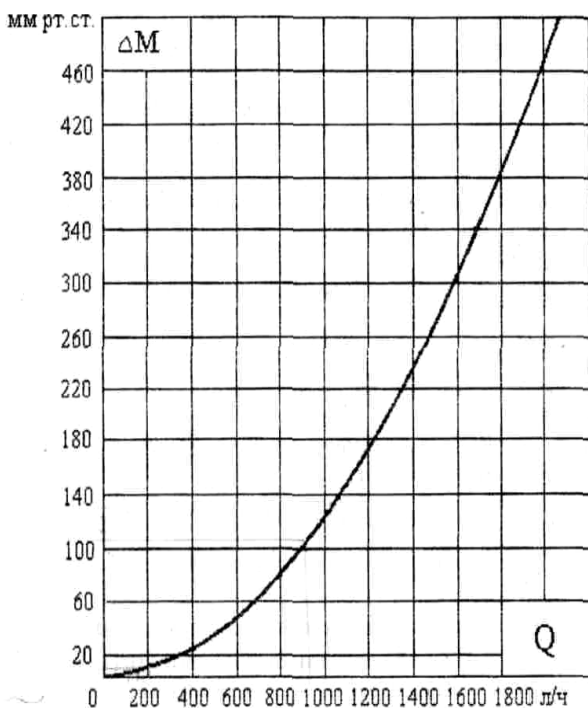


Рисунок 3.4 – Тарировочная кривая дифференциального манометра

Порядок проведения работы

1. Насос заливают водой из термостата с помощью насоса для залива 14 (см. рисунок 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 $Q_{\text{так}}$). При каждом режиме работы насоса снимают показания приборов, перечисленных в п. 3. Все данные замеров вносят в таблицу:

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

Обработка опытных данных

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

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 $N_{\text{п}}$.

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.

8. 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 вакууметрической 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 $l-l$ на рисунке 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.

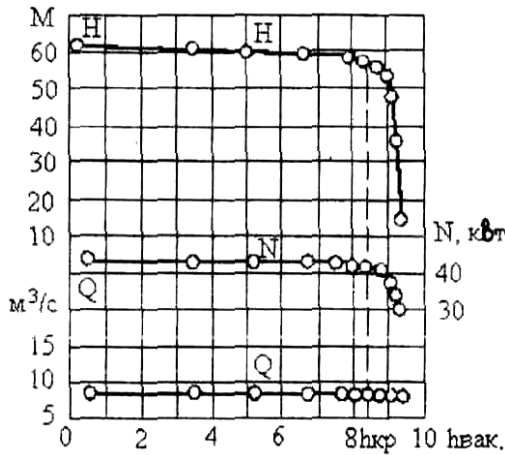


Рисунок 4.1 – Общий вид кавитационной характеристики насоса

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. рисунок 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 (см. рисунок 3.3).

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 п. 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. лабораторную работу № 3).

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. лабораторную работу № 3).

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.

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 рисунке 5.1, а 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).

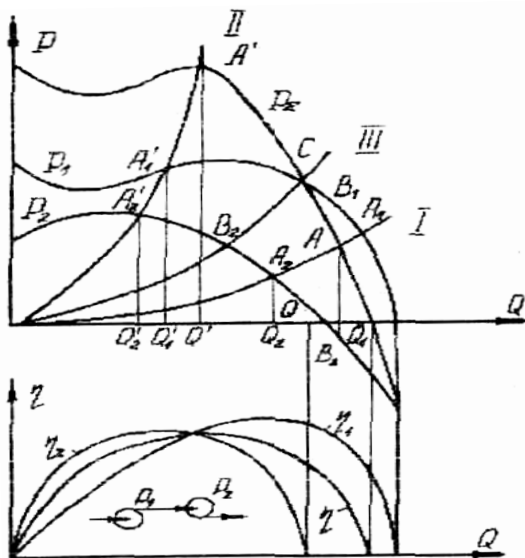


Рисунок 5.1 – Характеристики для двух различных вентиляторов

Из рисунка 5.1, а следует, что совместная работа вентиляторов на сеть I явно нерациональна: общая производительность двух вентиляторов P 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 ($P_2 < 0$).

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 $\eta(Q)$ (рисунок 5.1, б), которая позволяет решить вопрос о целесообразности и экономичности совместной

работы вентиляторов при последовательном включении. Наиболее экономичной работа вентиляторов при последовательном включении будет 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 (рисунок 5.2) включает следующие основные элементы: два центробежных вентилятора 1 с приводом от электродвигателей постоянного тока 4, напорный трубопровод 2, дроссельное устройство (набор диафрагм) 3, измерительную аппаратуру и блок питания. Измерительная аппаратура включает: ваттметры 10 для определения мощности, потребляемой электродвигателями; микроанометры ММН-240 8, 9 для определения полного и динамического напоров в напорном трубопроводе; преобразователь измерительный тахометрический ПИТ 6 и преобразователь первичный тахометрический ППТ 5. Блок питания включает автотрансформатор 12 и выпрямитель 11.

Порядок проведения работы

1. Перед началом опыта необходимо подготовить электронный тахометр к работе.
2. Включается блок питания.
3. Автотрансформатором 12 (см. рисунок 5.2) устанавливается число оборотов обоих вентиляторов, равное 2500 об/мин (при полностью открытом напорном трубопроводе). Снимают мощность, потребляемую электродвигателем вентиляторов. По микроанометрам 8, 9 определяют полный и динамический напоры в напорном трубопроводе.

4. С помощью дроссельного устройства (сменной диафрагм) дросселируют поток воздуха в напорном трубопроводе и снимают показания приборов при неизменном числе оборотов вентилятора до полного закрытия трубопровода.

5. Опыт повторяют при 2000, 1500 об/мин.

6. Показания приборов для всех режимов записывают в таблицу:

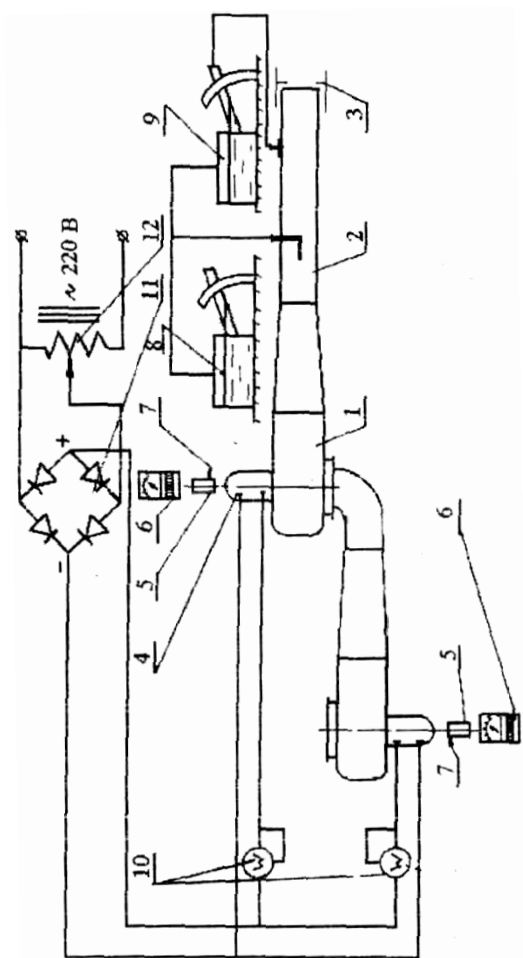


Рисунок 5.2 – Схема экспериментальной установки

№ П/П	Опытные данные				Рассчитанные данные			
	n , об/мин	$P_{\Sigma п}$, Па	$P_{\Sigma д}$, Па	N , Вт	$C_{ос}$, м/с	$C_{ср}$, м/с	Q , м ³ /с	η , %
1.1	2500							
1.2								
1.3								
1.4								
1.1	2000							
1.2								
1.3								
1.4								
1.1	1500							
1.2								
1.3								
1.4								

Обработка опытных данных

1. Определяется расход воздуха в напорном трубопроводе при различных режимах работы вентиляторов (методика определения расхода представлена в лабораторной работе № 1).

2. Строится суммарная напорная характеристика $P_{\Sigma} = f(Q)$. На этом же графике строится рабочая характеристика одного из вентиляторов (рабочие характеристики вентиляторов в лабораторных работах № 1 и 6 одинаковы).

3. Определяется полный коэффициент полезного действия двух последовательно включенных вентиляторов, работающих в различных режимах, по выражению

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

4. Строится зависимость $\eta_{\Sigma} = \varphi(Q)$ для случаев последовательной и раздельной работы вентиляторов.

5. Все рассчитанные данные записывают в ту же таблицу, что и данные, полученные опытным путем.

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

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 М–N и К–N (рисунок 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:

а) что 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 ($Q_1 + Q_2 = Q_{\Sigma}$).

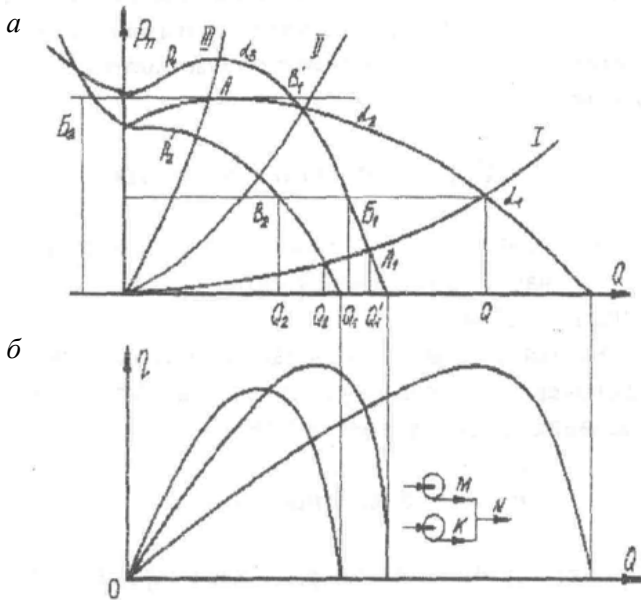


Рисунок 6.1 – Характеристики совместной работы вентиляторов

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 давления, 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 нецелесообразна; подача первого вентилятора при раздельной работе больше, чем общая подача при совместной работе. Чтобы установить причину этого, проведем через точку A 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 работы вентиляторов при параллельном включении – при отключении одного из вентиляторов режим работы второго вентилятора смещается в область больших подач. Так, 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 (рисунок 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.

Описание экспериментальной установки

Опытная установка (рисунок 6.2) включает следующие основные элементы: два центробежных вентилятора 1 с электродвигателями постоянного тока 4, приводящими во вращение рабочие колеса вентиляторов; напорный трубопровод 2; дроссельное устройство (набор диафрагм) 3; измерительную аппаратуру и блок питания. Измерительная аппаратура включает: ваттметры 10 для определения мощности, потребляемой электродвигателями; шесть микроманометров ММН-240 (на схеме рисунка 6.2 показаны только два микроманометра 8, 9 для определения полного и динамического напоров в напорном трубопроводе); преобразователь первичный тахометрический ППТ 5. Блок питания включает автотрансформатор 12 и выпрямитель 11.

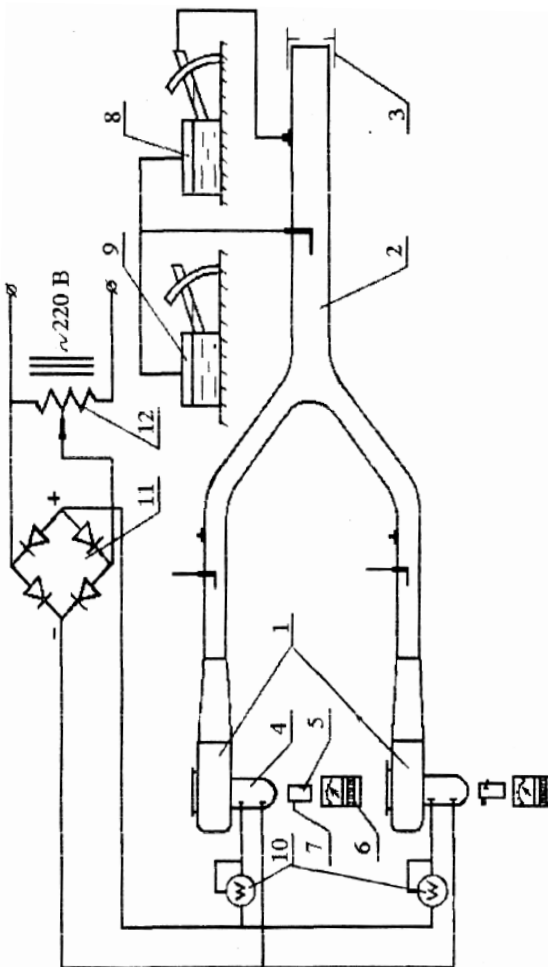


Рисунок 6.2 – Схема экспериментальной установки

Порядок проведения работы

1. Снимают рабочие характеристики одного и второго вентиляторов для случая их раздельной работы при 2250, 2000, 1750 об/мин.
2. Снимается суммарная рабочая характеристика двух параллельно включенных вентиляторов при тех же оборотах.
3. Показания приборов занести в таблицу:

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	$1 \cdot 10^{-5}$	$1,01972 \cdot 10^{-5}$	$9,86923 \cdot 10^{-6}$	0,101972	$750,062 \cdot 10^{-5}$
1 бар	10^5	1	1,01972	0,986923	10197,2	750,062
1 кгс/м ² (1 мм вод. ст.)	9,80665	$9,80665 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$9,67841 \cdot 10^{-5}$	1	$73,5559 \cdot 10^{-3}$
1 атм	$1,01325 \cdot 10^5$	1,01325	1,03323	1	$1,03323 \cdot 10^4$	760
1 ат (1 кгс/см ²)	$98,0665 \cdot 10^3$	0,980665	1	0,967841	10^4	735,559
1 мм рт. ст.	133,322	$68,9476 \cdot 10^{-3}$	$1,35951 \cdot 10^{-3}$	$1,31579 \cdot 10^{-3}$	13,5951	1

Обработка опытных данных

1. Строится суммарная напорная характеристика $P_{\Sigma} = \delta(Q)$. На этом же графике строятся индивидуальные напорные характеристики для каждого вентилятора.
2. Определяется полный коэффициент полезного действия для случаев совместной и раздельной работы вентиляторов.
3. Строится зависимость КПД и мощности вентиляторов для случаев раздельной и совместной работы.
4. Сравнивается, совпадает ли экспериментальная суммарная зависимость $P_{\Sigma} = \delta(Q)$ с построенной теоретически.

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 КПД (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»
дневной и заочной формы обучения

В 3 частях

Часть 1

Составители:

АЙДАРОВА Зоя Борисовна
ЧЕРНЫШЕВИЧ Владимир Иванович
САПУН Николай Николаевич

Редактор *Т. А. Зезюльчик*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 28.05.2014. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 2,33. Уч.-изд. л. 1,82. Тираж 100. Заказ 710.

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.