

## ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Перед включением насоса необходимо изучить устройство станда, его электрическую схему, схему измерений, проверить надежность заземления элементов станда, наличие воды в баке.

2. Включение и выключение установки, а также изменение режима работы производится студентами под наблюдением преподавателя или лаборанта.

3. При работе установки студенты должны находиться на тех рабочих местах, которые указаны им перед началом испытания. Переход с одного рабочего места на другое без разрешения преподавателя не допускается.

4. В лаборатории категорически запрещается пользоваться открытым огнем.

### Лабораторная работа № 1

## ИСПЫТАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является приобретение навыков проведения испытаний насосных установок, получение характеристик насосов и их анализ.

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Насосами называются машины для перемещения жидкостей и сообщения им энергии. Работающий насос превращает механическую энергию, подводимую от двигателя, в потенциальную, кинетическую и тепловую энергию потока жидкости. Насосы подразделяют на объемные, лопастные, струйные и пневматические. Лопастные насосы получили наиболее большое распространение. Это обусловлено удобством их ра-

боты от электропривода, компактностью, высоким КПД, возможностью достижения высоких давлений. По конструкции лопастные насосы подразделяют на осевые, центробежные и вихревые.

Основной частью центробежного насоса является рабочее колесо, состоящее из диска и расположенными на нем криволинейными лопастями. Рабочее колесо крепится на валу, который вращается двигателем, и помещается в неподвижный корпус. При вращении колеса жидкость, заполняемая межлопаточные каналы перемещается от центра центробежной силой к периферии, выбрасывается в спиральную камеру и поступает в напорный трубопровод, приобретая дополнительную кинетическую и потенциальную энергию. Вследствие разрежения у оси колеса через всасывающий трубопровод и приемное отверстие происходит непрерывное всасывание жидкости.

Основными параметрами, характеризующими работу насоса, являются подача и напор (или давление), развиваемое насосом. Совершенство насоса характеризуется его КПД  $\eta$ , а совершенство всей насосной установки – полным КПД  $\eta_y$ . Энергетический масштаб насоса определяется полезной мощностью  $N_n$  или мощностью насоса  $N$ , а для насосной установки – мощностью электродвигателя  $N_{эл}$ .

Подачей называется количество жидкости, перемещаемое насосом в единицу времени. Различают массовую подачу  $M$ , кг/с и объемную подачу  $Q$ , м<sup>3</sup>/с. Очевидно, что

$$M = \rho \cdot Q, \quad (1.1)$$

где  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>.

Развиваемое насосом давление определяется выражением

$$p = p_{\kappa} - p_{\eta} + \rho(c_{\kappa}^2 - c_{\eta}^2)/2 + \rho g(z_{\kappa} - z_{\eta}), \quad (1.2)$$

Где  $p_{\eta}$  и  $p_{\kappa}$  – соответственно давление на входе в насос (начальное) и на выходе из насоса (конечное), Па;

$c_{\eta}$  и  $c_{\kappa}$  – средние скорости потока на входе и на выходе, м/с;

$z_{\eta}$  и  $z_{\kappa}$  – высоты расположения центров входного и выходного сечений насоса;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Напором называется величина

$$H = p/(\rho g), \quad (1.3)$$

измеряемая в метрах.

Полный напор, развиваемый насосом, определяется выражением

$$H = \frac{(p_{\kappa} - p_{\eta})}{(\rho g)} + \frac{(c_{\kappa}^2 - c_{\eta}^2)}{(2g)} + (z_{\kappa} - z_{\eta}) \quad (1.4)$$

и представляет собой разность полных давлений в потоке, выраженную высотой столба перекачиваемой жидкости.

Статическим напором называется величина

$$H_{ст} = \frac{(p_{\kappa} - p_{\eta})}{(\rho g)} - (z_{\kappa} - z_{\eta}), \quad (1.5)$$

то есть

$$H_{\dot{n}\dot{o}} = H - H_{\dot{a}}, \quad (1.6)$$

где  $H_d = \frac{(c_k^2 - c_n^2)}{(2g)}$  – динамический (скоростной) напор.

Важной энергетической характеристикой насоса является полезная удельная работа  $L_n$ , Дж/кг:

$$L_n = p / \rho = gH, \quad (1.7)$$

представляющая собой работу, получаемую потоком от лопастей насоса, отнесенную к 1 кг массы жидкости.

Полезная мощность  $N_n$ , Вт насоса, развивающего напор  $H$  при подаче  $M$ , составит

$$N_n = ML_n, \quad (1.8)$$

или

$$N_n = MgH = \rho QgH = pQ. \quad (1.9)$$

Энергетическая эффективность насоса определяется его КПД:

$$\eta = N_n / N, \quad (1.10)$$

где  $N$  – подводимая от двигателя к валу насоса мощность, называемая мощностью насоса.

КПД насосной установки помимо потерь в насосе учитывает потери в электродвигателе:

$$\eta_y = N_n / N_{эл}, \quad (1.11)$$

где  $N_{эл}$  – мощность, подводимая к электродвигателю.

Каждый насос при заданной частоте вращения имеет определенные зависимости напора, мощности и КПД от пода-

чи. Эти зависимости называются характеристиками. В частности, зависимость  $H(Q)$  называется напорной характеристикой насоса. Определить зависимость  $H(Q)$ , а также  $N(Q), \eta(Q)$  можно экспериментально, путем изменения в определенном диапазоне гидравлических характеристик  $H_n(Q)$  присоединяемой к насосу трубопроводной системы (сети) и измерения параметров на нескольких режимах совместной устойчивой стационарной работы насоса и сети.

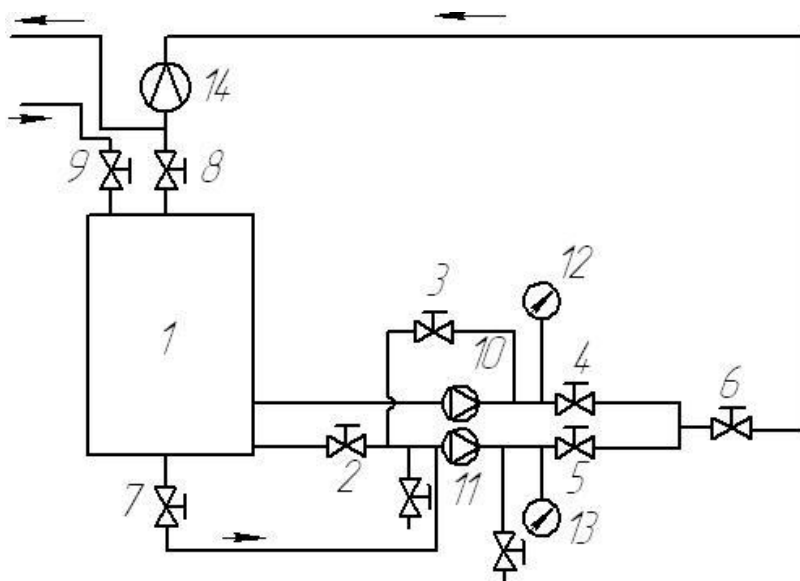


Рис.1 Схема циркуляционной установки

1 – бак; 2-9 – вентили; 10 – насос №1; 11 – насос №2; 12-13 – манометры; 14 – расходомер.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В процессе выполнения лабораторной работы необходимо:

- а) изучить состав лабораторной установки;
- б) составить гидравлическую схему стенда и протокол измерений;
- в) провести эксперименты по снятию характеристик отдельных насосных установок;
- г) провести испытания при параллельном и последовательном соединениях насосов;
- д) по данным испытаний построить характеристики насосов.

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Лабораторный стенд состоит из двух насосных установок, бака с водой 1, трубопроводной сети и пульта управления с измерительными приборами.

Трубопроводная сеть с регулирующей арматурой выполнена таким образом, чтобы обеспечить как автономную работу насосных установок, так и совместную работу насосов (параллельную или последовательную). Насос №1 имеет непосредственное соединение с баком. Насос №2 может быть отключен от бака и подключен к напорной магистрали насоса №1 при последовательном соединении насосов.

Для изменения сопротивления сети предусмотрен регулирующийся ventиль 6 на общем участке нагнетательного трубопровода.

Давление над насосами измеряется с помощью манометров. Измерение давления перед насосами не предусмотрено.

Подача измеряется с помощью объемного расходомера.

Для измерения мощности электродвигателей служат амперметры и вольтметры.

## ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ОТДЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ НАСОСОВ №1 И №2

Таблица 1

$P_{1,2}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$Q_{1,2}$ , л/мин	$I_{1,2}$ , А	$U_{1,2}$ , В

## ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ НАСОСОВ

Таблица 2

$P_1$ , кгс/см <sup>2</sup>	$P_2$ , кгс/см <sup>2</sup>	$Q_1$ , л/мин	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$U_1$ , В	$U_2$ , В

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Выполнение лабораторной работы производится в следующей последовательности.

1. Составить гидравлическую схему лабораторного стенда и протокол измерений.

2. Подготовить к работе насос №1: проверить подключение приборов; заполнить насос водой, для этого в случае если бак 1 пуст, заполнить его водой открыв вентиль 9. Закрыть вентиль 5 на напорном трубопроводе. Вентиль 8 должен быть всегда открыт, а вентиль 7 всегда закрыт.

3. При закрытых вентилях 3 и 4 на напорном трубопроводе запустить насос. Произвести измерения параметров и занести их в протокол испытания.

4. Открыть полностью вентили 4 и 6 на напорном трубопроводе, произвести измерения.

5. Прикрывая напорный вентиль 6, произвести измерения параметров на нескольких промежуточных режимах, исходя из диапазона развиваемых насосом давлений.

6. Те же действия повторить с насосом №2, предварительно открыв вентиль 2.

7. Произвести испытания при параллельном соединении насосов.

8. Произвести испытания при последовательном соединении насосов. Для этого нужно полностью закрыть вентили 2, 4 и 6, полностью открыть вентили 3 и 5, и произвести измерения при зарытом, частично открытом и полностью открытом вентиле 6.

9. Слив воды из системы осуществляется при закрытом вентиле 2, 3 и 8, и включенных насосах №1 и №2.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

На основе протокола испытаний необходимо рассчитать и построить основные характеристики отдельных насосных установок, а также характеристики при совместной работе насосов:

1)  $H(Q)$ ;

2)  $N_r(Q)$ ;

3)  $\eta_o(Q)$ .

По режиму максимального КПД установки определяют наилучшие условия эксплуатации насоса.

После построения напорных характеристик необходимо проверить соответствие характеристик отдельных насосов и характеристик при их совместной работе.

## ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет по работе должен содержать:



- 1) название и цель работы;
- 2) принципиальную гидравлическую схему установки с указанием измерительных приборов;
- 3) протокол измерений;
- 4) подробное изложение обработки результатов измерений;
- 5) графическое представление характеристик;
- 6) указание наилучшего режима насосов;
- 7) анализ результатов сопоставления характеристик при совместной работе насосов и полученных на основе характеристик отдельных насосов.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется насосом?
2. Как устроен и как действует центробежный насос?
3. Какие величины характеризуют работу насоса?
4. Чем отличается КПД насоса от КПД насосной установки?
5. Почему полезная мощность меньше мощности насоса?
6. Что такое подача?
7. Что такое напор?
8. Как связаны напор и удельная полезная работа?
9. Как подсчитать полезную мощность?
10. Что понимается под характеристиками насоса?
11. Почему перед пуском центробежный насос необходимо заполнить водой?
12. Что дает закрытие вентиля на напорном трубопроводе при пуске насоса?
13. Каким путем регулируется подача насоса при испытании?
14. Как на основе характеристик отдельных насосов построить напорные характеристики при их совместной работе?

## Лабораторная работа №2

### ИСПЫТАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ВЕНТИЛЯТОРА

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является приобретение навыков проведения испытаний вентилятора, получение характеристик и их анализ.

## КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Вентиляторами называют машины для перемещения газов при степени повышения давления до 1.15. По конструкции вентиляторы подразделяют на осевые и центробежные. Рабочими органами вентиляторов являются лопасти. В осевой машине поток газа перемещается лопастями вдоль оси вращения, в центробежной – в поперечном направлении. Характерным признаком центробежного вентилятора является повышение давления за счёт центробежной силы газа, движущегося в рабочем колесе от центра к периферии.

Вследствие незначительного повышения давления изменением плотности газа в вентиляторе можно пренебречь. Поэтому к вентиляторам применимы основные понятия и уравнения, относящиеся к насосам (см. указания к лабораторной работе №1).

Основными параметрами, характеризующими работу вентилятора, являются объемная подача  $Q$  и напор  $H$  (или давление  $p$ ), а также статический напор  $H_{cm}$ . Характеристиками вентиляторов называют зависимости напора (давления), мощности  $N$  и КПД  $\eta$  (и  $\eta_{cm}$  по  $H_{\dot{v}0}$ ) от подачи при постоянной частоте вращения  $n$ . Характеристики получают испытанием вентиляторов на воздухе и представляют в виде графиков для плотности  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ , соответствующей нормальным условиям ( $T_0 = 293\text{K}$ ,  $p_0 = 103\text{кПа}$ ) и относительной влажности  $\varphi = 50\%$ . Для других условий работы дав-

ление и мощность пересчитываются пропорционально изменению  $\rho$ .

Центробежные вентиляторы выпускаются сериями геометрически подобных машин. Каждая серия характеризуется постоянством отношений подобных размеров. Для машин одной серии применяются безразмерные характеристики  $\bar{H}(\bar{Q}), \bar{H}_{\bar{n}\bar{d}}(\bar{Q}), \bar{p}(\bar{Q}), \bar{N}(\bar{Q}), \eta(\bar{Q}), \eta_{\bar{n}\bar{d}}(\bar{Q}),$

$$\text{где } \bar{Q} = \frac{4Q}{(u_2 \pi D_2^2)} \quad (2.1)$$

называют коэффициентом подачи;

$$\bar{H} = H / u_2^2 \quad \bar{H}_{cm} = H_{cm} / u_2^2 \quad (2.2)$$

называют коэффициентом напора (статического напора);

$$\bar{p} = p / (\rho u_2^2) \quad (2.3)$$

называют коэффициентом давления;

$$\bar{N} = \frac{4N}{\rho \cdot u_2^3 \cdot \pi \cdot D_2^3} \quad (2.4)$$

называют коэффициентом мощности,

$$u_2 = \pi D_2 n / 60 ; \quad (2.5)$$

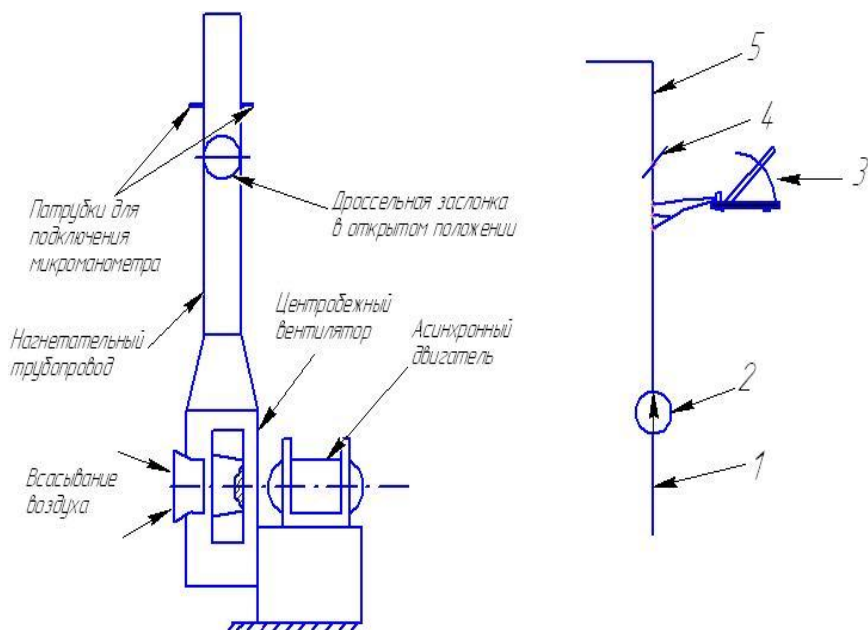
$D_2$  - наружный диаметр;  $n$  - частота вращения (об/мин).

Согласно ГОСТу обозначение центробежных вентиляторов включает: букву Ц, указывающую на тип вентилятора – центробежный;

пятикратное значение коэффициента полного давления  $\bar{p}$  на режиме максимального КПД, округленное до целого числа; значение коэффициента быстроходности

$$n_s = n\sqrt{Q} / H^{3/4} \quad (2.6)$$

округленное до целого числа; номер вентилятора (значение  $D_2$  в дециметрах).



## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В процессе выполнения лабораторной работы необходимо:

- 1) изучить конструкцию лабораторной установки;
- 2) составить гидравлическую схему стенда и протокол измерений;

- 3) провести испытания вентилятора;
- 4) по данным испытаний построить размерные и безразмерные характеристики вентилятора.

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Лабораторный стенд состоит из центробежного вентилятора 1 типа Ц4-70-4, трехфазного асинхронного двигателя (привод вентилятора), нагнетательного трубопровода 5 с заслонкой 4 и пульта управления с измерительными приборами. Нагнетательный трубопровод снабжен штуцерами для измерения статического давления и трубкой полного напора для измерения динамического напора.

Для измерения статического напора и подачи вентилятора используются микроманометры 3 марки ММН-240. Для измерения напора микроманометром измеряют избыточное статическое давление в нагнетательном трубопроводе за вентилятором. Для определения подачи микроманометром измеряется динамический напор в нагнетательном трубопроводе.

Для измерения электрической мощности, потребляемой приводом используют вольтметр и амперметр.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Лабораторная работа производится в следующей последовательности.

1. Составить схему лабораторного стенда.
2. Подготовить протокол испытаний.
3. При закрытой заслонке включить двигатель.
4. Меняя положение заслонки, произвести измерения параметров согласно форме протокола. При измерении избыточного давления за вентилятором штуцер микроманометра, отмеченной знаком «+», соединяется со штуцером на нагнетательном трубопроводе, а штуцер, отмеченный знаком «-» - с атмосферой. При измерении динамического напора штуцер

«+» соединяется с двумя концами трубки полного напора, а штуцер «-» - со штуцером на боковой поверхности в том же сечении трубопровода.

5. Выключить двигатель.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

На основе испытаний необходимо рассчитать и построить размерные и безразмерные характеристики вентилятора. Обработка результатов испытаний производится в следующей последовательности.

1. По показанию барометра вычисляется атмосферное давление

$$p_a = B_0 \cdot 10^{-3} \rho_{pm} g, \text{ Па} \quad (2.7)$$

где  $\rho_{\partial\partial} = 13600 \text{ кг/м}^3$  - плотность ртути,

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  - ускорение свободного падения.

2. Используя показания психрометра, определяется относительная влажность  $\varphi$ .

3. Вычисляется давление водяных паров

$$p_i = \varphi \cdot p_i, \quad (2.8)$$

где  $p_i$  - давление насыщения при температуре воздуха  $t_s$  - определяется по таблицам или диаграммам водяного пара.

4. По известным формулам определяются: объемная доля водяного пара во влажном воздухе

$$r_n = p_n / p_a, \quad (2.9)$$

кажущаяся молекулярная масса влажного воздуха

$$\mu_{\text{возд}} = \mu_{\text{H}_2\text{O}} r_n + \mu_{\text{с.возд}} (1 - r_n) , \quad (2.10)$$

газовая постоянная

$$R_{\text{возд}} = 8315 / \mu_{\text{возд}} , \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \quad (2.11)$$

и плотность воздуха

$$\rho_{\text{возд}} = p_a / (R_{\text{возд}} (t_c + 273)) , \quad (2.12)$$

где  $\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ кг/кмоль}$  и  $\mu_{\text{с.возд}} = 29,3 \text{ кг/кмоль}$  - молярные массы соответственно водяного пара и сухого воздуха.

5. По показаниям микроманометра, который измеряет давление высотой столба жидкости, определяется статический напор вентилятора

$$H_{\text{ст}} = k_n l_n \cdot 10^{-3} \rho_{\text{ж}} g / (\rho_{\text{возд}} g) , \quad (2.13)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  - плотность жидкости в микроманометре,

$10^{-3}$  - коэффициент перевода показания  $l_i$  из мм в м.

6. Используя показания микроманометра, вычисляется динамический напор в напорном трубопроводе:

$$H_{\text{дин}} = (p^* - p_{\text{ст}}) / (g \rho_{\text{возд}}) = k_Q l_Q \cdot 10^{-3} \rho_{\text{ж}} g / (g \rho_{\text{возд}}) , \quad (2.14)$$

где  $p^*$  - давление заторможенного потока,

и из уравнения Бернулли

$$\frac{p_{\text{ст}}}{\rho_{\text{возд}}} + \frac{c_2^2}{2} = \frac{p^*}{\rho_{\text{возд}}} , \quad (2.15)$$

определяется скорость потока воздуха в нагнетательном трубопроводе:

$$c_2 = \sqrt{2(p^* - p_{cm}) / \rho_{возд}} = \sqrt{2gH_{дин}} . \quad (2.16)$$

7. Объемная подача (производительность) вентилятора определяется выражением

$$Q = c_2 f_2 , \quad (2.17)$$

где  $f_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}$  - площадь сечения нагнетательного трубопровода ( $d_2 = 89$  мм - диаметр).

8. Полный напор вентилятора определяется выражением

$$H = H_{cm} + (c_2^2 - c_1^2) / 2g , \quad (2.18)$$

где 
$$c_1 = Q / f_1 , \quad (2.19)$$

$$f_1 = \pi \cdot d_1^2 / 4 , \quad (2.20)$$

$d_1 = 0,25$  м – диаметр входного сечения.

9. Развиваемое вентилятором давление подсчитывается по формуле

$$p = \rho_{возд} gH . \quad (2.21)$$

10. Полезная мощность вентилятора равна

$$N = pQ . \quad (2.22)$$

11. КПД вентилятора подсчитывается по формулам

$$\eta = N / N_{эл} \quad (2.23)$$



$$\text{и} \quad \eta_{cm} = \rho_{возд} g H_{cm} Q / N_{эл}, \quad (2.24)$$

$$\text{где} \quad N_{\text{вѐ}} = \sqrt{3} UI \cos \varphi - \quad (2.25)$$

электрическая мощность;  $\cos \varphi = 0,83$  .

12. По результатам обработки экспериментальных данных строятся размерные характеристики вентилятора, с пересчетом  $p$  и  $N$  для плотности  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$  .

13. Строятся безразмерные характеристики вентилятора.

Протокол испытания

центробежного вентилятора за \_\_\_\_\_ (дата)

Марка: Ц4-70-4.

Газ: атмосферный воздух.

Частота вращения:  $n =$  \_\_\_\_\_ об/мин.

№ опыта (положение заслонки)	Атмосферное давление (показание барометра) $B_0$ , мм.рт.ст.	Показание психрометра, °C		Напряжение $U$ , В	Ток $I$ , А	К измерению			
		$t_c$	$t_i$			напора		расхода	
						$l_i$ , мм	$k_i$	$l_Q$ , мм	$k_Q$
1									
2									
3									
4									
5									

Испытания провел \_\_\_\_\_ (подпись) \_\_\_\_\_ (Ф.И.О., группа)

Примечания:

1. Для определения напора микроманометром измеряют избыточное ( по сравнению с атмосферным) давление в нагнетательном трубопроводе за вентилятором.

2. При определении расхода микроманометром измеряют динамический напор в нагнетательном трубопроводе.

3.  $l_i, l_Q$  - число делений на шкале микроманометра.

4.  $k_i, k_Q$  – коэффициенты микроманометра, переводящие показание на шкале в высоту столба жидкости (синус угла наклона трубки микроманометра); для напора  $k_i \approx 0,2$  , для расхода  $k_Q \approx 0,2...0,4$ .

## ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет по работе должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Принципиальную схему установки с указанием измерительных приборов.
3. Протокол испытаний.
4. Подробное изложение обработки результатов испытания.
5. Графики  $H=f(Q)$ ,  $N=f(Q)$ ,  $\eta=f(Q)$ ,  $\eta_{cm}=f(Q)$ ,  $H_{cm}=f(Q)$ ..
6. Анализ характеристик и указание наилучшего режима работы вентилятора.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется вентилятором?
2. Чем отличается центробежный вентилятор от осевого?
3. Почему к вентилятору применимы основные уравнения, относящиеся к насосам?
4. Какие величины характеризуют работу вентилятора?

5. Как связаны между собой давление и напор, развиваемые вентилятором?
6. Чем отличается статический напор от полного напора?
7. Какой параметр поддерживается постоянным при испытании вентилятора?
8. На каком газе проводятся заводские испытания вентиляторов и для какой плотности представляют результаты испытания?
9. Чем характеризуется серия вентиляторов?
10. Что такое безразмерные характеристики?
11. Как обозначают центробежные вентиляторы? Что называется его номером?
12. Что такое коэффициент быстроходности?
13. Почему рекомендуется пускать центробежный вентилятор при закрытой заслонке на нагнетательном трубопроводе?
14. Чем достигается изменение подачи вентилятора при испытании?

### Лабораторная работа №3.

## ИСПЫТАНИЕ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Ознакомится с устройством и принципом работы поршневого компрессора.
2. Определить основные показатели работы компрессора.

### СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

При эксплуатации компрессора возникает необходимость периодической проверки его состояния. Обычно производятся либо частичные /проверочные/ испытания с целью проверки состояния отдельных узлов компрессорной установ-

ки, либо полные испытания, при которых устанавливается техническое состояние компрессора, фактическая производительность и технико-экономические показатели его работы.

При полных испытаниях компрессора определяются:

1. Фактическая производительность.
2. Объемный коэффициент и коэффициент подачи.
3. Степень повышения давления отдельных ступеней и компрессор в целом.

4. Индикаторные работы и мощность.

5. Мощность на валу.

6. Индикаторные, механический и полный КПД.

7. Удельный расход электроэнергии.

Для записи зависимости фактического изменения давления в цилиндре компрессора от хода поршня используется специальный прибор – индикатор.

Действительный цикл поршневого компрессора, записанный с помощью индикатора, называется индикаторной диаграммой.

На рис. 1,2 показаны индикаторные диаграммы двухступенчатого поршневого компрессора.

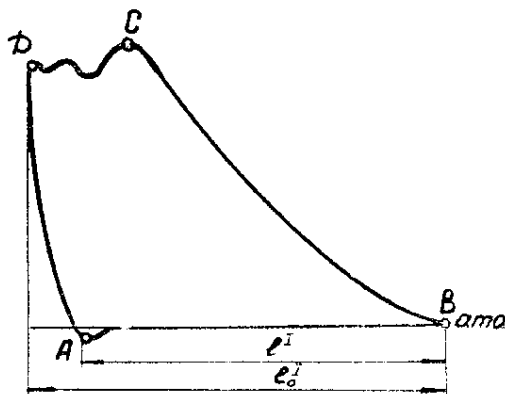


Рис.1. Индикаторная диаграмма первой ступени.

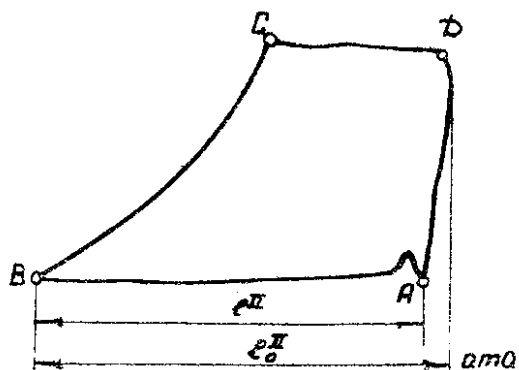


Рис.2. Индикаторная диаграмма второй ступени.

На этих диаграммах линия АВ описывает процесс всасывания. В точке А открывается всасывающий клапан, а в точке В закрывается. Линия ВС изображает процесс сжатия газа. В точке С открывается нагнетательный клапан. По линии СД происходит процесс выталкивания газа. Линия ДА соответствует процессу расширения оставшегося в цилиндре газа. Разность между  $l_0$  и  $l$  определяет величину мертвого пространства. Отсюда, объемный КПД

$$\eta = \frac{l}{l_0} \quad (3.1)$$

Величина индикаторного давления  $P_i$  определяется делением площади индикаторной диаграммы  $l_0$  и масштаб пружины индикатора  $m$  :

$$P_i = \frac{F}{l_0 m} \quad (3.2)$$

Индикаторная мощность определяется по формуле:

$$N_i = \frac{P_i V_0 n}{60 \cdot 102}, \text{ кВт} \quad (3.3)$$

где:  $V_0$  - рабочий объем цилиндра, м<sup>3</sup>;

$n$  - число оборотов, об/мин .

Индикаторные диаграммы позволяют определить основные показатели работы компрессора. Сравнение полученных данных с паспортными показателями работы компрессора позволяют установить причину отклонения фактических величин от номинальных.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для испытания поршневого компрессора состоит из горизонтального одноцилиндрового со ступенчатым поршнем компрессора с промежуточным холодильником, приводного электродвигателя с ременной передачей, предохранительного клапана, водомаслоотделителя, всасывающей и нагнетательной труб, контрольно-измерительных приборов. Принципиальная схема двухступенчатого компрессора приведена на рис.3.

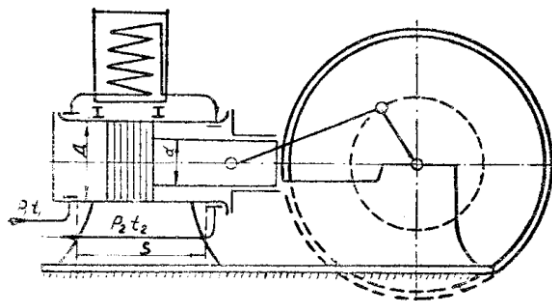


Рис.3

Характеристика компрессора:

1. Число ступеней – 2.
2. Диаметр цилиндра первой ступени  $D=0,26\text{м}$ .

3. Меньший диаметр ступенчатого поршня  $d = 0,23$  м.
4. Ход поршня  $S = 0,2$  м.
5. Число оборотов  $n = 120$  об/мин.

## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Предварительно внешним осмотром убедится в исправности установки и ее готовности к пуску (наличие масла, воды и пр.), а затем запустить ее.

Испытание начинать при установившемся режиме работы компрессора. Каждый студент обязан снять индикаторную диаграмму первой и второй ступени компрессора (рис. 5,6).

ПРИМЕЧАНИЕ: К проведению испытания студенты допускаются после предварительного ознакомления с установкой и с данной инструкцией, а также после инструктажа о порядке пуска и о правилах техники безопасности.

### ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ.

1. Давление воздуха на входе в компрессор:

$$P_1 = \frac{B}{735,6}, \text{ кг/см}^2 \quad (3.4)$$

где:  $B$  - барометрическое давление, мм.рт.ст.

2. Рабочий объем цилиндра первой ступени:

$$V_0^1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S, \text{ м}^3 \quad (3.5)$$

3. Рабочий объем цилиндра второй ступени:

$$V_0^2 = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \cdot S, \text{ м}^3 \quad (3.6)$$

4. Объемный КПД 1 ступени, определяемый по индикаторной диаграмме:

$$\eta_V = \frac{l^1}{l_0^1} \quad (3.7)$$

5. Объем всасываемого воздуха, определяемый по индикаторной диаграмме:

$$V_1 = V_0^1 \cdot \eta_V \cdot n, \quad \text{м}^3/\text{мин} \quad (3.8)$$

6. Удельный вес воздуха на входе в компрессор:

$$\gamma_1 = \frac{P_1 \cdot 10^4}{R \cdot T_1}, \quad \text{кг/м}^3 \quad (3.9)$$

где  $R = 29,27$  - газовая постоянная воздуха, кгм/кг.град ;

$T_1 = 273 + t_1$  - температура всасываемого воздуха, °К .

7. Вес всасываемого воздуха:

$$G = V_1 \cdot \gamma_1, \quad \text{кг/мин} \quad (3.10)$$

8. Количество тепла, переходящее в охлаждающую воду:

$$Q = G \cdot c_p \cdot (t_2' - t_2'') \quad , \quad \text{кал/мин} \quad (3.11)$$

где:  $c_p$  - теплоемкость воздуха при постоянном давлении;

$t_2'$  - температура воздуха перед холодильником, °С ;

$t_2''$  - температура воздуха после холодильника, °С .



9. Среднее индикаторное давление первой ступени:

$$P_i^1 = \frac{F^1}{l_0^1 \cdot m^1} \quad , \text{ кг/см}^2 \quad (3.12)$$

где:  $F^1$  - площадь индикаторной диаграммы первой ступени,  $\text{мм}^2$ ;

$l_0^1$  - длина диаграммы, мм;

$m^1 = 6$  - масштаб пружины индикатора первой ступени,  $\frac{\text{мм}}{\text{кг/см}^2}$  .

10. Среднее индикаторное давление второй ступени:

$$P_i^2 = \frac{F^2}{l_0^2 \cdot m^2} \quad , \text{ кг/см}^2 \quad (3.13)$$

где:  $F^2$  - площадь индикаторной диаграммы второй ступени,  $\text{мм}^2$ ;

$l_0^2$  - длина диаграммы, мм;

$m^2$  - масштаб пружины индикатора первой ступени,  $\frac{\text{мм}}{\text{кг/см}^2}$  .

11. Индикаторная мощность первой ступени:

$$N_i^1 = \frac{P_i^1 \cdot 10^4 \cdot V_0^1 \cdot n}{60 \cdot 102} \quad , \text{ кВт} \quad (3.14)$$

12. Индикаторная мощность второй ступени:

$$N_i^2 = \frac{P_i^2 \cdot 10^4 \cdot V_0^2 \cdot n}{60 \cdot 102} \quad , \text{ кВт} \quad (3.15)$$

13. Суммарная индикаторная мощность:

$$N_i = N_i^1 + N_i^2 \quad , \text{ кВт} \quad (3.16)$$

14. Расход мощности на  $1 \text{ л}^3$  всасываемого воздуха в минуту:

$$N = \frac{N_i}{V_i} \quad , \text{ кВт} \quad (3.17)$$

15. Мощность приводного двигателя компрессора:

$$N_0 = \frac{N_i}{\eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{пер}}} \quad , \text{ кВт} \quad (3.18)$$

где:  $\eta_{i\dot{a}\ddot{o}}$  - механический КПД;

$\eta_{i\dot{a}\ddot{o}}$  - КПД ременной передачи;

Для испытываемого компрессора:

$$\eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{пер}} = 0,8 \quad (3.19)$$

16. Удельный расход электроэнергии:

$$e = \frac{N_0 \cdot \eta_V}{V_i \cdot 60} \quad , \quad \frac{\text{кВт} \cdot \text{час}}{\text{л}^3} \quad (3.19)$$

## Лабораторная работа №4

### ИСПЫТАНИЕ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является приобретение навыков по проведению испытания энергетического оборудования, изучение устройства турбины, экспериментальное определение потерь на трение и вентиляцию.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Турбиной называют тепловой двигатель кинетического действия. В зависимости от вида работающего тела турбины подразделяют на паровые и газовые. Механическая энергия в турбине получается за счет кинетической энергии потока, образующейся из внутренней энергии рабочего тела. По направлению потока относительно вращающегося вала турбины различают осевые и радиальные. Совокупность неподвижных сопел и следующих за ними вращающихся лопаток образует ступень турбины. Различают одноступенчатые и многоступенчатые турбины. При расширении рабочего тела только в соплах ступень (турбина) называется активной. Для повышения КПД при больших скоростях потока в активных ступенях применяется многократный подвод к рабочим лопаткам (турбины со ступенями скорости).

Эффективность преобразования энергии в ступени характеризуется ее внутренним относительным КПД:

$$\eta_{0i} = \frac{h_i}{h_0} = \frac{(h_0 - h_c - h_l - h_{ec} - h_{ms} - h_{ym} - h_{el})}{h_0}, \quad (4.1)$$

где:  $h_i$  - превращенный в работу /использованный/ перепад энтальпии;

$h_0$  - располагаемый перепад энтальпии;

$h_c, h_l, h_{ec}, h_{me}, h_{ym}, h_{ei}$  - потери энергии соответственно в соплах, на лопатках, с выходной скоростью, на трение и вентиляцию, от утечек, от влажности.

Для первых ступеней и для одноступенчатых турбин наиболее существенными являются первые четыре вида потерь. Для активной одноступенчатой турбины их можно определить по следующим формулам:

$$h_c = (1 - \varphi^2) \cdot h_0 \quad , \quad (4.2)$$

$$h_l = (1 - \psi^2) W_1^2 / 2 \quad , \quad (4.3)$$

$$h_{ec} = c_2^2 / 2 \quad , \quad (4.4)$$

$$h_{me} = N_{me} / 2 \quad , \quad (4.5)$$

где  $\varphi$ ,  $\psi$  - коэффициенты скорости для сопла и рабочей решетки;

$$\overset{u}{W}_1 = \overset{p}{c}_1 - u \quad - \quad (4.6)$$

относительная скорость потока на входе в колесо;

$$c_1 = \sqrt{2h_0} \cdot \varphi \quad - \quad (4.7)$$

скорость на выходе из сопла (направленная под углом  $\alpha_1$  к плоскости вращения);

$$u = \pi \cdot d \cdot n / 60 \quad - \quad (4.8)$$

окружная скорость ( $n$  – число оборотов в минуту,  $d$  – средний диаметр ступени);

$$\rho_2 = \rho + W_2^2 \quad - \quad (4.9)$$

абсолютная скорость на выходе из колеса;

$$W_2 = \psi \cdot W_1 \quad - \quad (4.10)$$

относительная скорость на выходе из колеса (направляется под углом  $\beta_2$  к плоскости вращения);

$N_{me}$  – мощность потерь на трение и вентиляцию;

$G$  – расход рабочего тела.

Обычно потери на трение и вентиляцию рассчитываются по полуэмпирической формуле Стодола

$$N_{me} = \lambda \cdot \rho [1,07d^2 + 0,61(1 - \varepsilon)z \cdot l_2^{1,5} \cdot d] \mu^3 \cdot 10^{-6}, \text{ кВт} \quad (4.11)$$

где  $\lambda$  – коэффициент, зависящий от рабочего тела (для воздуха  $\lambda = 1$ );

$\rho$  – плотность среды, в которой вращается диск;

$\varepsilon$  – степень парциальности;

$z$  – число венцов рабочих лопаток;

$l_2$  – высота лопатки, см.

Мощность  $N_{\partial a}$  можно определить и экспериментально.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В процессе выполнения лабораторной работы необходимо:

- 1) изучить состав лабораторной установки;

- 2) произвести эксперимент по измерению затрат мощности на трение и вентиляцию;
- 3) изучить конструкцию турбины, составить схему прочной части, измерить основные геометрические параметры турбины;
- 4) произвести оценку основных потерь в турбине, ее мощности и КПД.

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Лабораторный стенд состоит из турбогенератора, трансформатора, выпрямителя и пульта с измерительными приборами.

Турбогенератор является источником постоянного тока. Он состоит из электрического генератора и активной паровой турбины с двукратным осевым подводом пара к рабочему колесу. Генератор рассчитан на номинальную мощность 1 кВт,  $n=3500$  об/мин при подаче 0,1 кг/с сухого насыщенного пара с давлением 1,1 МПа.

Конструктивно электрогенератор и турбина представляют единое целое. Якорь генератора и диск турбины расположены на одном валу, который вращается в шарикоподшипниках. Корпус состоит из двух частей, с вертикальным разъемом. Подшипники располагаются в корпусе генератора. Диск турбины расположен консолью. Корпус турбины закрывается крышкой, на которой устанавливается паровая распределительная коробка с золотником для управления подачей пара. Пар подводится к паровой коробке и через золотник, с понижением давления до 0,85 МПа (на номинальном режиме) поступает к соплу. Вторичный подвод осуществляется с помощью направляющей лопатки, закрепленной в корпусе турбины. Число оборотов турбины поддерживается постоянным за счет управления расхода пара с помощью центробежного регулятора, прямого действия, расположенного на конце вала. Выпуск пара осуществляется через патрубок на крышке тур-

бины. Утечки пара в сторону электрического генератора предотвращаются установкой уплотнительных колец. Для снижения потока теплоты от турбины к генератору между уплотнителем и подшипником располагается вентилятор.

Рабочее колесо турбины состоит из стального диска и рабочих лопаток, между которыми вставляются вкладыши для образования межлопаточных рабочих каналов. Лопатки крепятся на диске хвостовиками, имеющими форму ласточкиного хвоста, а по наружному диаметру скрепляются бандажем. Посадка диска на вал осуществляется через коническую вилку, на которой диск фиксируется в осевом положении с помощью гайки, являющейся одновременно корпусом центробежного регулятора. Вращающий момент между диском и валом передается через шпонку.

Уплотнение турбины со стороны генератора образуется тремя разрезными кольцами, вставленными в выточку на ступице диска и плотно прилегающими к поверхности сальниковой втулки. За первым кольцом во втулке имеется ряд отверстий, сообщающихся со штуцером на корпусе для отвода конденсата.

Электрический генератор представляет собой двухполюсную динамо-машину со смешанным возбуждением. Для измерения числа оборотов при стендовых испытаниях на свободном конце вала генератора установлен датчик тахометра.

Трансформатор и выпрямитель, включенные в состав лабораторного стенда, предназначены для использования динамо-машины в качестве двигателя при экспериментальном определении потерь на трение и вентиляцию.

Щит управления снабжен приборами для контроля за работой установки и измерения ее параметров (напряжения и ток генератора, число оборотов, напряжение в сети).

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Выполнение лабораторной работы производится в следующей последовательности:

1) Подготовить протокол испытания.  
2) Произвести наружный осмотр турбогенератора, убедиться в надежности крепления болтовых соединений, убедиться в свободном вращении вала, проверить заземление, состояние электрических проводов и надежность их крепления к генератору. Ознакомится с устройством пульта управления и приборами.

3) Занять рабочие места на стенде по указанию преподавателя, соблюдая правила техники безопасности.

4) Установить рукоятку управления трансформатором в положение холостого хода. Подать напряжения на трансформатор.

5) Постепенно увеличивая подаваемое на генератор напряжение, начать разгон турбины, контролируя набор оборотов по тахометру и ограничивая частоту вращения значением 1000 об/мин.

При достижении 1000 об/мин записать показания приборов в протокол.

6) Постепенно увеличивая напряжение, подаваемое на генератор, отметить в протоколе показания приборов на других режимах, вплоть до  $n=3000$  об/мин.

7) Постепенно снижая напряжение, выключить установку.

8) Снять с вала рабочее колесо и повторить испытания (п.п. 5-7).

9) Отключить установку от сети.

10) Изучить устройство турбогенератора, составить схему проточной части (течения газа через сопло, рабочие лопатки и направляющую лопатку), измерить геометрические параметры проточной части (площадь сопла, высоту лопаток



$l_2$ , Средний диаметр  $d$ , углы подвода пара на колесо из сопла и направляющей лопатки, геометрические углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$  рабочей решетки).

ПРОТОКОЛ  
испытания турбины \_\_\_\_\_  
(дата)

а) Испытания с диском

Число оборотов $n$ , об/мин	Напряжение $U$ , В	Ток $I$ , А
1000		
1500		
2000		
2500		
3000		

б) испытания без диска

Число оборотов $n$ , об/мин	Напряжение $U$ , В	Ток $I$ , А
1000		
1500		
2000		
2500		
3000		

Размеры проточной части \_\_\_\_\_

Испытание провел \_\_\_\_\_  
(подпись) (Ф.И.О., группа)

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

1. Обработать результаты эксперимента в виде зависимости потерь мощности на трение и вентиляцию от числа оборотов, вычитая из общих потерь мощности в турбине и электрогенераторе потери, полученные при испытании без диска.

2. Сопоставить экспериментальные результаты с расчетными по формуле (11), учитывая, что в эксперименте  $\rho \approx 1,3 \text{ кг/см}^3$ ;  $\varepsilon = 0$ ;  $z = 1$ .

3. Произвести оценку основных потерь в турбине, ее мощности и КПД при работе паром на номинальном режиме, используя полученные экспериментальные данные.

Принять: коэффициенты скорости для всех каналов, включая и направляющую лопатку,  $\varphi = \psi = 0,9$ ; выхлоп – в атмосферу; для пара  $\lambda = 1,2$ ;  $\rho$  – по  $i, s$  – диаграмме водяного пара.

Учесть потери в направляющей лопатке.

## ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет по работе должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Схему проточной части турбины.
3. Протокол испытаний.
4. Треугольники скоростей, графики.
5. Подробное изложение обработки результатов и оценки параметров турбины.
6. Анализ результатов эксперимента и расчета.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое турбина?
2. Что представляет собой турбина со ступенями скорости?
3. Дайте определение внутреннего относительного КПД.
4. Какие виды потерь в ступени известны?

5. Из-за чего получаются потери на трение и вентиляцию?
6. Формулы для определения потерь?
7. Как построить треугольник скоростей на входе в колесо? На выходе из колеса?
8. Что такое коэффициент скорости?
9. Как вычислить расход рабочего тела?
10. Что такое парциальный подвод пара и чему равна степень парциальности?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Черкасский В.М. Вентиляторы, насосы, компрессоры: Учебник для теплоэнергетических специальностей вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.
2. Нигматулин И.Н., Ценев В.А., Шляхин П.Н. Тепловые двигатели: Учеб. пособие для втузов. – М.: Высш. школа, 1974. – 375с.

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам № 1-4  
по курсу «Нагнетатели и тепловые двигатели»  
для студентов направления 140104 «Промышленная тепло-  
энергетика» очной и заочной формы обучения

Составители:

Стогней Владимир Григорьевич  
Солженикин Павел Анатольевич  
Финько Сергей Филлипович

Редактор Бокарев Е.И.

Компьютерный набор Н.В. Малых

Подписано в печать

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 2,6. Уч.-изд. л.2,4. Тираж экз. «С»

Заказ №