

*А. И. Иванченко, д-р техн. наук, проф.*

**С89** Судовые вспомогательные механизмы, устройства и системы : метод. указания / сост. Н. М. Подволоцкий. — СПб. : Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2019. — 88 с.

Рассмотрено понятие насосной установки и определение рабочей точки системы, на свойствах которой базируется выполнение всех последующих лабораторных работ. Приведены напорные характеристики центробежного (тип лопастных) и винтового (тип объемных) насосов, на примере которых показано различие между мягкой и жесткой напорными характеристиками, накладывающими ограничения на условия эксплуатации оборудования. На примере параллельного и последовательного включения в работу центробежных насосов показано изменение свойств их напорных характеристик.

Предназначено для курсантов 3-го, 4-го курсов и студентов заочного обучения судомеханического факультета.

Рекомендовано к изданию на заседании кафедры теплотехники, судовых котлов и вспомогательных установок. Протокол № 7 от 26 марта 2019 года.

УДК 629.553: 629.5.065

ББК 39.45

© ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова», 2019  
© Н.М. Подволоцкий, 2019

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

**Цель работы:** приобрести практические навыки технического использования центробежного и винтового насосов; понять суть физических процессов, происходящих в судовой насосной установке.

Принципиальная схема лабораторной насосной установки приведена на рис. 1.

В ее состав входят:

- один центробежный насос НЦВ 25/20 (3);
- два центробежных насоса НЦВ 25/30 (4, 5);
- два винтовых насоса ЭВН 3/5 (1, 2);
- трубопроводы, запорная и регулирующая арматура;
- емкости;
- контрольно-измерительные приборы: манометры, мановакуумметры, расходомеры.

Насосная установка лабораторного стенда предназначена:

- для изучения технического использования насосов лопастного и объемного типов;
- для проведения испытаний с целью изучения свойств напорных характеристик насосов лопастного и объемного типов, их параллельной и последовательной работы, регулирования подачи, а также других видов работ.

Этапы изучения насосной установки включают:

- изучение трубопроводной системы насосной установки и составляющих ее элементов;
- изучение технического использования механизмов и оборудования, входящего в состав лабораторной насосной установки;
- проведение лабораторных испытаний для изучения свойств характеристик насосов при работе в составе трубопроводной системы.

Принципы построения трубопроводных систем лабораторного стенда и судовых систем являются аналогичными. Правила технического использования лабораторной насосной установки и судовых систем также в основном аналогичны.

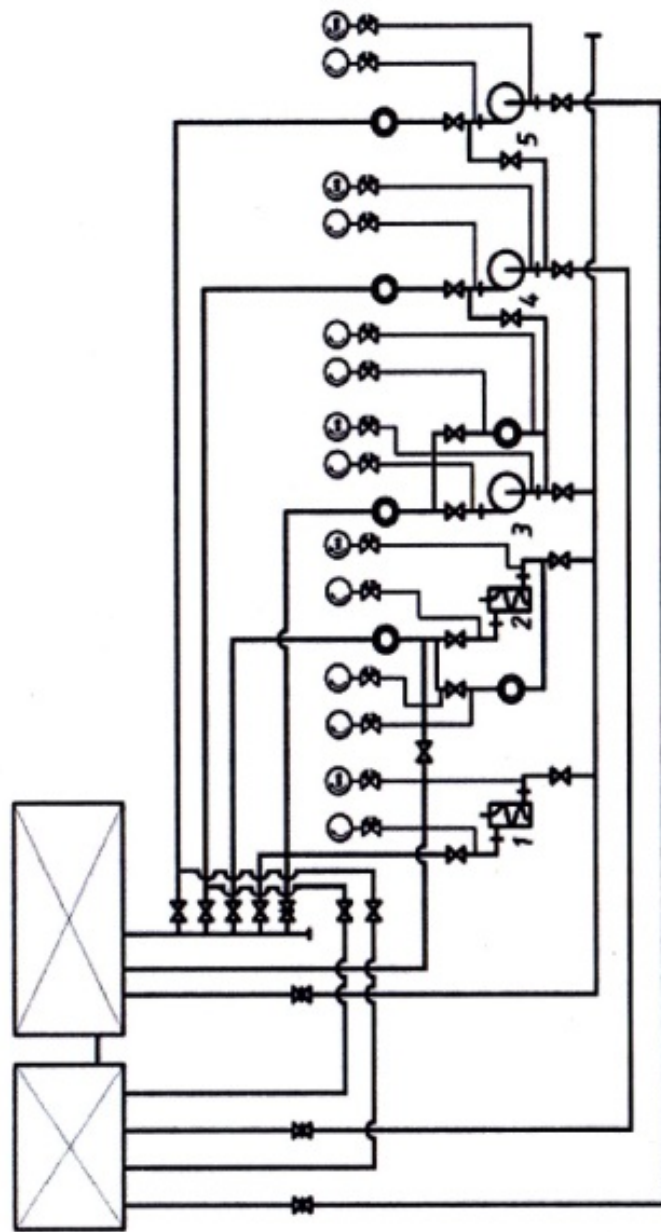


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной насосной установки:  
1, 2 — винтовой насос ЭВН/5; 3 — центробежный насос НЦВ 25/20;  
4, 5 — центробежный насос НЦВ 25/30

Таким образом, выполнение лабораторной работы позволяет расширить понимание физических процессов, происходящих в судовой насосной установке, и повысить качество эксплуатации вспомогательного оборудования при работе на судах.

Стенд позволяет производить испытания как при отдельной, так и при совместной работе насосов.

Марки центробежных насосов НЦВ 25/20 и НЦВ 25/30 означают: Н — насос, Ц — центробежный, В — вертикальный. Цифры в числителе относятся к подаче в м<sup>3</sup>/ч, в знаменателе — к напору в м вод. ст.

Марка винтовых насосов ЭВН 3/5 означает: Э — электроприводной, В — винтовой, Н — насос. Цифра в числителе — подача в м<sup>3</sup>/ч, в знаменателе — напор в м вод. ст.

Основные технические данные насосов стенда приведены в следующей таблице.

| Величина                       | Размерность       | Тип насоса |           |         |
|--------------------------------|-------------------|------------|-----------|---------|
|                                |                   | НЦВ 25/20  | НЦВ 25/30 | ЭВН 3/5 |
| Подача                         | м <sup>3</sup> /ч | 25         | 25        | 3       |
| Напор                          | м вод. ст.        | (20±5)%    | (30±5)%   | 5       |
| Кавитационный запас            | м вод. ст.        | 3,5        | 4         |         |
| КПД                            | %                 | 67         | 68        |         |
| Тип привода                    | Электродвигатель  |            |           |         |
| Мощность электродвигателя      | кВт               | 3,1        | 4,1       | 2,1     |
| Напряжение тока                | В                 | 380        | 380       | 380     |
| Мощность, потребляемая насосом | кВт               | 2,3        | 3,3       |         |
| Утечка через уплотнение        | л/ч               | 1          | 1         |         |

Паспортные характеристики центробежных электроприводных насосов при заводских испытаниях на воде плотностью 10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup> при температуре 20 °С приведены на рис. 2.

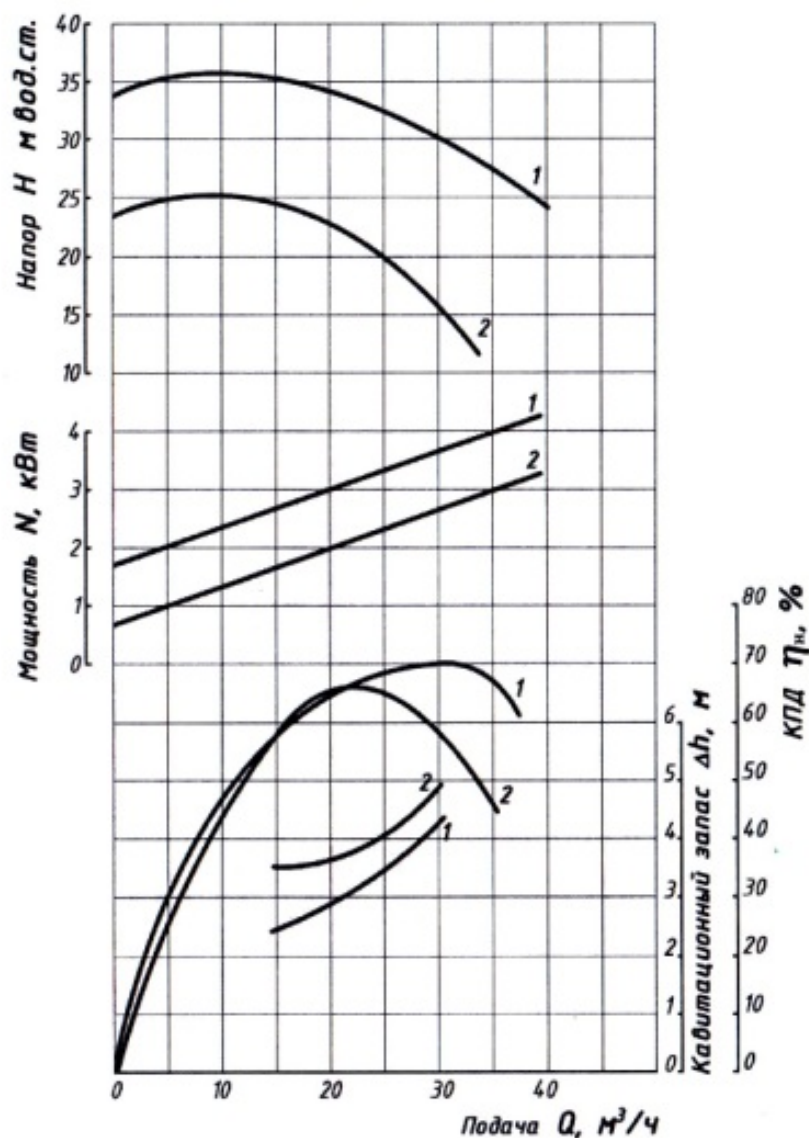


Рис. 2. Паспортные характеристики центробежных насосов

### Конструкция и принцип действия центробежного насоса марки НЦВ

Конструкция насоса НЦВ представляет собой моноблок, состоящий из одноступенчатого центробежного насоса и электродвигателя.

Центробежный насос (рис. 3) состоит из корпуса 12, крышки 5, рабочего колеса 10, фонаря 3, узла сальникового уплотнения 14, 16. Корпус насоса крепится к фонарю 3, который, в свою очередь, крепится к фланцу электродвигателя. Рабочее колесо 10 насажено на удлиненный конец вала электродвигателя. Крепление рабочего колеса на валу осуществляется посредством шпонки 7, шайбы 11 и гайки 12. В крышке корпуса установлено мягкое уплотнение, к которому из напорной полости по каналу подводится жидкость для образования гидравлического затвора и охлаждения уплотнения. Вал электродвигателя защищен от износа бронзовой втулкой.

Принцип действия насоса заключается в следующем. Перекачиваемая жидкость подводится к оси вращения рабочего колеса, под действием вращения которого лопатками отбрасывается центробежной силой к периферии. В освободившееся пространство из всасывающего трубопровода на вход рабочего колеса непрерывно поступает жидкость, формируя процесс всасывания. С периферии рабочего колеса жидкость поступает в улиткообразный канал, где кинетическая энергия потока превращается в статический напор.

### Конструкция и принцип действия винтового насоса марки ЭВН

Конструкция насоса ЭВН представляет собой моноблок, состоящий из одновинтового насоса и электродвигателя.

Винтовой насос (рис. 4) состоит из корпуса 1, обоймы 2, винта 3, карданного вала 4, приводного вала 5, подшипника 6 и уплотнения 7. Насос снабжен предохранительно-перепускным клапаном (не попавшим в разрез), который при возрастании давления выше допустимого перепускает часть жидкости из полости нагнетания в полость всасывания.

В процессе работы насоса перекачиваемая жидкость заполняет свободные пространства между винтом и обоймой, геометрически изолированные из-за взаимного соприкосновения, и перемещается винтом вдоль его оси в камеру нагнетания. Возникающие в процессе работы

осевые усилия передаются на радиально упорные подшипники или опорные подшипники скольжения особой конструкции.

Обойма обычно выполняется упругой (из резины), но может быть и жесткой. Винт в упругой обойме может иметь зазор или натяг. При жестких обоймах между винтом и обоймой образуется зазор.

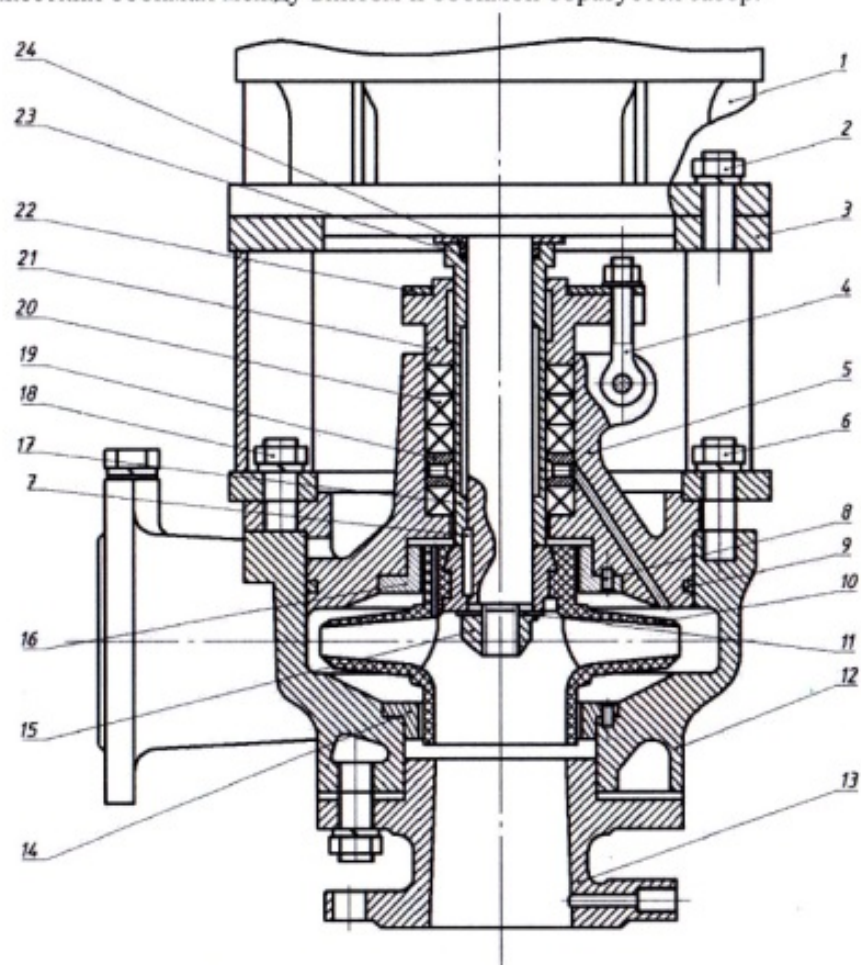


Рис. 3. Конструкция центробежного насоса:

1 — электродвигатель; 2, 6, 18 — гайка; 3 — фонарь; 4 — болт откидной; 5 — крышка; 7 — шпонка; 8 — винт; 9, 23 — кольцо резиновое; 10 — рабочее колесо; 11 — шайба стопорная; 12 — корпус; 13 — патрубок всасывающий; 14, 16 — кольцо уплотнительное; 15 — гайка рабочего колеса; 17 — втулка защитная; 19 — кольцо гидравлического затвора; 20 — набивка сальника; 21 — втулка нажимная; 22 — накладка; 24 — кольцо

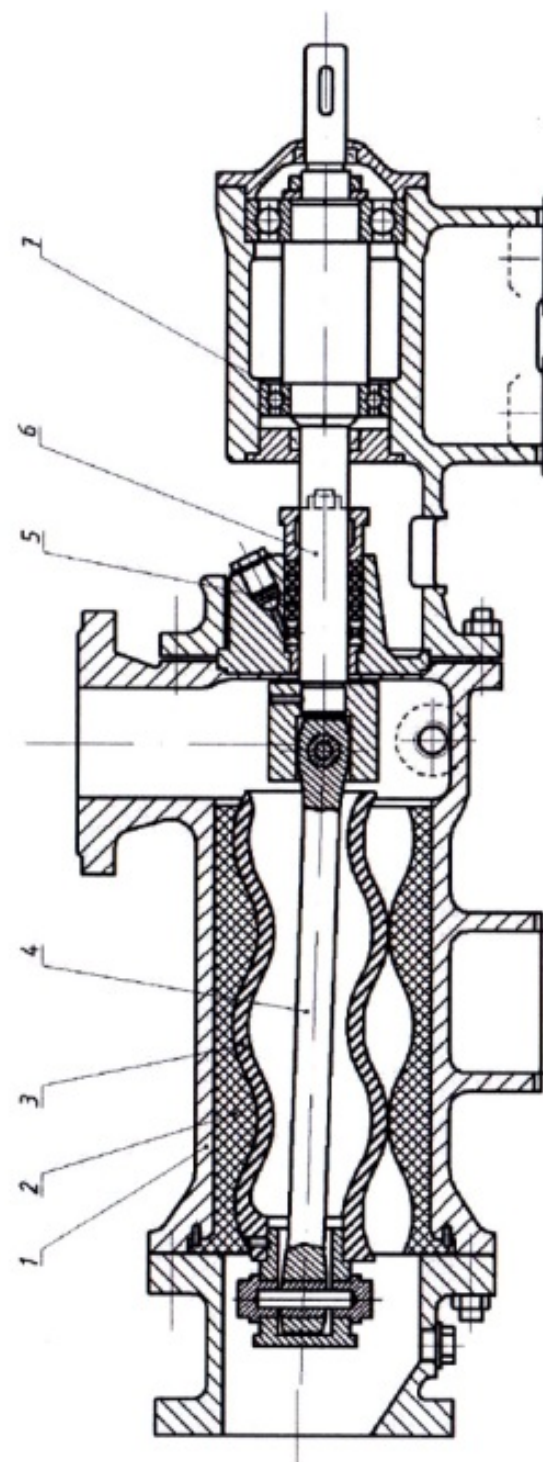


Рис. 4. Конструкция винтового насоса:

1 — корпус; 2 — обойма; 3 — винт; 4 — карданный вал; 5 — уплотнения; 6 — приводной вал; 7 — подшипник.

## Порядок выполнения работы

Предусматривается выполнение процедур по вводу насосов в действие, обслуживанию во время работы и остановке отдельно для центробежного и винтового насосов.

### *Центробежный насос*

До начала работы необходимо ознакомиться с правилами техники безопасности, правилами технического использования насоса, схемой насосной установки стенда.

Подготовка насосной установки к действию предусматривает выполнение следующих процедур:

- убедиться, что емкости стенда подготовлены к работе и заполнены водой;
- проверить плотность фланцевых и штуцерных соединений трубопроводов, сальников клапанов и насоса, контрольно-измерительных приборов;
- произвести внешний осмотр насоса, электродвигателя, контрольно-измерительных приборов и убедиться в их исправности;
- открыть на системе клапаны, необходимые для выполнения лабораторной работы;
- проверить наличие жидкости в насосе и приемном трубопроводе, при необходимости заполнить насос.

Для пуска центробежного насоса необходимо выполнить следующие процедуры:

- закрыть клапан на нагнетательной стороне насоса;
- проверить готовность к действию электродвигателя и запустить его;
- медленно, во избежание гидравлического удара, открыть нагнетательный клапан системы и вывести насос на установившийся режим работы.

Проверить по показаниям манометра, мановакуумметра и расходомера работу насоса на установившемся режиме, используя паспортные данные.

При работе насоса необходимо контролировать:

- показания манометра, мановакуумметра, расходомера;
- плотность сальниковых уплотнений насоса, клапанов, фланцевых и штуцерных соединений;
- температуру подшипников насоса;
- появление посторонних шумов в насосе, клапанах и трубопроводах.

В случае обнаружения неисправностей сообщить об этом преподавателю и принять меры к их устранению.

Для остановки центробежного насоса необходимо:

- закрыть нагнетательный клапан;
- выключить электродвигатель;
- закрыть клапаны на системе;
- отключить контрольно-измерительные приборы.

### *Винтовой насос*

Общие указания по выполнению лабораторной работы на центробежном насосе соответствуют указаниям для винтового насоса.

Операции по подготовке винтового насоса аналогичны процедурам, выполняемым при подготовке центробежного насоса. Разница состоит, в первую очередь, в том, что правила технического использования насосов предусматривают открытие клапанов при нагнетании винтового насоса.

Запуск винтового насоса производится при открытых клапанах на стороне нагнетания системы.

В период работы винтового насоса действия по его обслуживанию аналогичны приведенным для центробежного насоса.

Для остановки винтового насоса необходимо:

- выключить приводной электродвигатель;
- закрыть клапаны в системе;
- отключить контрольно-измерительные приборы.

Далее необходимо изучить:

- входящие в состав стенда контрольно-измерительные приборы, обратив внимание на их назначение, принцип действия и точность измерения;

– возможности насосной установки лабораторного стенда по перемещению жидкости, обратив внимание на схемы последовательной и параллельной работы насосов.

Под параллельной работой понимают включение двух и более насосов, имеющих индивидуальный прием жидкости и подающих ее в один общий трубопровод. Параллельное соединение приводит к увеличению подачи.

Под последовательной работой понимают включение двух и более насосов в один общий трубопровод, причем каждый насос подает жидкость с нагнетания на прием следующего, что приводит к увеличению напора.

Необходимо самостоятельно выполнить схему лабораторного стенда. Входящие в состав схемы элементы должны быть выполнены в соответствии с ГОСТ (приложение 4).

Параметры входящего в схему оборудования необходимо представить отдельным списком.

### Оформление отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать наименование, назначение, принцип действия и точность измерения контрольно-измерительных приборов, входящих в состав лабораторного стенда

### Лабораторная работа № 2

#### СНЯТИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ «НАПОР-ПОДАЧА» ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

**Цель работы:** изучить свойства характеристики «напор-подача» центробежного насоса; закрепить знания по техническому использованию насоса.

Лабораторная работа выполняется на одном из насосов: НЦВ 25/30, подача  $25 \text{ м}^3/\text{ч}$ , напор 30 м вод. ст., частота вращения  $2860 \text{ мин}^{-1}$ , мощность привода 4,1 кВт или НЦВ 25/20, подача  $25 \text{ м}^3/\text{ч}$ , напор 20 м вод. ст., частота вращения  $2870 \text{ мин}^{-1}$ , мощность привода 3,1 кВт.

В работе также используются измерительные приборы: манометр, мановакуумметр, расходомер, трубопроводы, запорная и регулирующая арматура, емкости.

Принципиальная схема насосной установки для снятия характеристики «напор-подача» ( $H - Q$ ) центробежного насоса представлена на рис. 1.

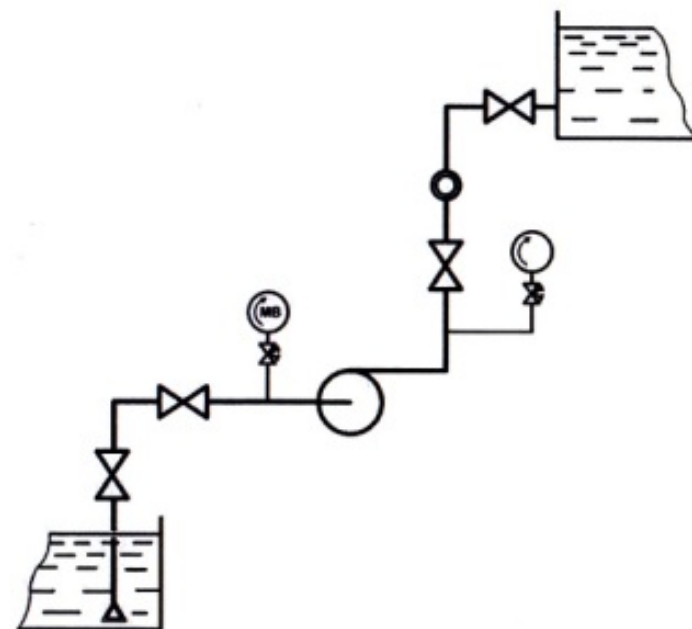


Рис. 1. Принципиальная схема установки для снятия характеристики «напор – подача» центробежного насоса

Характеристика «напор-подача» входит в паспортные данные насоса и представляя собой зависимость изменения напора от подачи.

Для получения характеристики «напор-подача» все изготавливаемые насосы проходят стендовые заводские испытания на воде по специальной программе.

В лабораторных условиях для получения характеристики «напор-подача» также проводят испытания, целью которых является получение достаточного количества точек для установления закономерности изменения напора насоса для подач в диапазоне от нулевой до номинальной.

Испытания на лабораторной установке проводят следующим образом. Задают количество режимов работы насоса не менее пяти, охватывая подачу от нулевой до номинальной. Чаще всего режимы работы задают через равномерные промежутки подач, что соответствует вертикальным линиям на рис. 2.

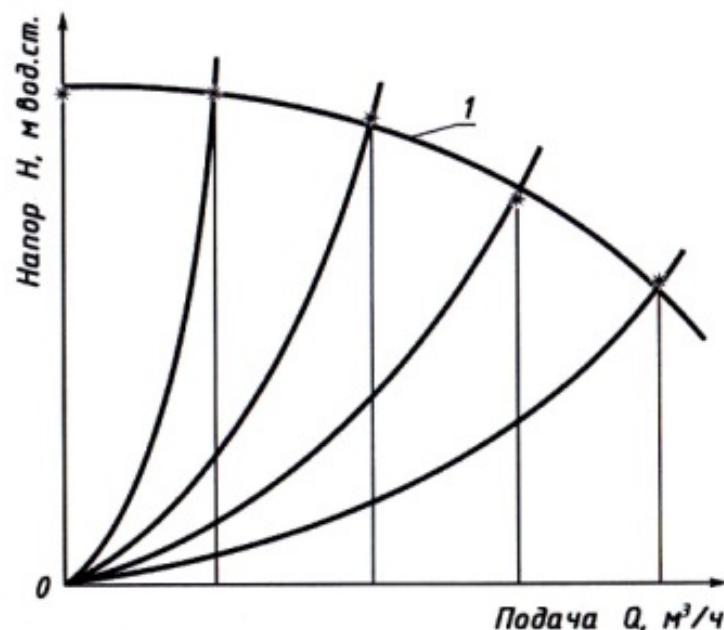


Рис. 2. Интерпретация процесса снятия характеристики «напор-подача» центробежного насоса:

(\*) — экспериментальные точки; 1 — характеристика «напор-подача» насоса

С увеличением числа режимов повышается точность получения характеристики «напор-подача». При заводских испытаниях минимальное число режимов устанавливают от 8 до 10, проходят их в прямом направлении изменения подач от нуля до номинальной и обратно.

На каждом режиме при проведении испытаний необходимо замерить напор насоса. Его величину наносят на график, откладывая значение напора на вертикальных линиях, соответствующих заданному режиму работы насоса (см. рис. 2).

Величина подачи при испытаниях устанавливается по расходомеру. Напор насоса замеряют по показаниям манометра и мановакуумметра. Напор насоса измеряется в м вод. ст., а манометр и мановакуумметр

имеют шкалу, выраженную в единицах давления. Поэтому сначала снимают величину давления, создаваемую насосом, а затем переходят к напору, выраженному в м вод. ст.

Замер значений давления всасывания и нагнетания насоса должен выполняться с учетом поправок, обусловленных неточностью начальных показаний манометра и мановакуумметра. Вследствие длительной или ненормальной эксплуатации приборы могут иметь вместо нулевых показаний некоторую величину. Ее неучет исказит результаты испытаний. Кроме того, на начальные показания приборов оказывает влияние начальный подпор жидкости, передаваемой от емкостей при открытых клапанах системы.

С учетом поправок исправленное давление нагнетания

$$p_{н.и} = p_n - \Delta p_n$$

где  $p_n$  — давление нагнетания;  $\Delta p_n$  — поправка к начальным показаниям манометра.

С учетом поправок исправленное давление всасывания составит

$$p_{вс.и} = p_{вс} \pm \Delta p_{вс}$$

где  $p_{вс}$  — давление всасывания;  $\Delta p_{вс}$  — поправка к начальным показаниям мановакуумметра.

Знак  $\pm$  для мановакуумметра обусловлен тем, что начальные показания могут отклоняться от нуля в сторону давления или вакуума. Для манометра поправка имеет только отрицательное значение, так как она может изменяться только в сторону давления.

С учетом вышеизложенного, давление, создаваемое насосом

$$p = p_{н.и} \pm \Delta p_{вс.и}$$

Знак «+» в формуле соответствует случаю, когда уровень жидкости в емкости на всасывании расположен ниже оси насоса (см. рис. 1), а знак «-» в формуле — когда уровень жидкости в емкости на всасывании расположен выше оси насоса.

Перевод давления создаваемого насосом в м вод. ст. осуществляется по соотношению

$$H = \frac{p}{\rho g}$$

где  $\rho$  — плотность перекачиваемой жидкости;  $g$  — ускорение свободного падения.

## Порядок выполнения работы

1. До начала испытаний необходимо ознакомиться с правилами техники безопасности, правилами технического использования центробежного насоса и схемой насосной установки, на которой будет выполняться лабораторная работа. Назначить руководителя для выполнения лабораторной работы.

2. Распределить обязанности группы (подгруппы) для выполнения лабораторной работы, включающие следующие процедуры:

- подготовку и ввод насосной установки в действие, наблюдение за работой;
- снятие показаний манометра, мановакуумметра, расходомера;
- проверочный расчет величины напора насоса;
- задание режимов работы насоса;
- ведение протокола испытаний.

3. Подготовка насосной установки к действию предполагают выполнение следующих процедур:

- убедиться, что емкости стенда подготовлены к работе;
- произвести внешний осмотр насоса, электродвигателя, трубопроводов, арматуры, контрольно-измерительных приборов, убедиться в их исправности;
- проверить плотность фланцевых и штуцерных соединений трубопроводов, сальников насоса и клапанов, контрольно-измерительных приборов;
- открыть клапаны на системе, необходимые для выполнения лабораторной работы;
- проверить наличие жидкости в насосе и приемном трубопроводе, при необходимости заполнить трубопроводы и насос;
- снять поправки к показаниям манометра и мановакуумметра при неработающем насосе, внести их в протокол испытаний.

4. Запустить центробежный насос при закрытом нагнетательном клапане. Медленно открыть нагнетательный клапан и вывести насос на установившийся режим, который наступает примерно через 2 мин после изменения параметров.

5. Снять показания манометра и мановакуумметра на режиме холостого хода (при нулевой подаче).

6. Выполнить проверку правильности снятия показаний манометра и мановакуумметра. Для этого необходимо по формулам, приведенным в основных теоретических положениях, рассчитать напор насоса в режиме холостого хода. Их значение должно быть примерно равно 35 м вод. ст. для насоса НЦВ 25/30 и 25 м вод. ст. для насоса НЦВ 25/20. Если указанное значение напора выдержано, то можно продолжать лабораторную работу. В противном случае необходимо найти ошибку и только после этого продолжать выполнение работы.

Напор холостого хода является первой точкой характеристики «напор-подача». Для получения других точек делим паспортную подачу испытуемого насоса на участки, кратные  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Таким образом, вторая точка характеристики будет получена при подаче  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ , третья — при  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$  и т. д. Режимы устанавливаются путем открытия нагнетательного клапана.

7. На каждом режиме провести замер давлений на нагнетании и на всасывании. Результаты замеров заносятся в таблицу испытаний с последующим расчетом напора на каждом режиме

По двум параметрам: подаче и напору, строим характеристику «напор-подача» насоса. Готовая характеристика представляет собой среднее значение напоров для различных подач. Замеренные значения напоров могут лежать над или под кривой. Обработка результатов испытаний проводится по известному математическому методу наименьших квадратов.

Полученная характеристика «напор-подача» центробежного насоса относится к типу мягких характеристик, когда значительному изменению подачи соответствует относительно малое изменение напора.

### Протокол испытаний центробежного насоса

| Величины                                  | Обозначение/<br>формула               | Размерн<br>ость   | Режимы работы |  |  |  |  |  |
|-------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------|--|--|--|--|--|
|                                           |                                       |                   |               |  |  |  |  |  |
| Подача в систему                          | $Q$                                   | м <sup>3</sup> /ч |               |  |  |  |  |  |
| Давление нагнетания                       | $p_n$                                 | МПа               |               |  |  |  |  |  |
| Поправка к давлению нагнетания            | $\Delta p_n$                          | МПа               |               |  |  |  |  |  |
| Исправленное значение давления нагнетания | $p_{ни} = p_n - \Delta p_n$           | МПа               |               |  |  |  |  |  |
| Давление всасывания                       | $p_{вс}$                              | МПа               |               |  |  |  |  |  |
| Поправка к давлению всасывания            | $\Delta p_{вс}$                       | МПа               |               |  |  |  |  |  |
| Исправленное значение давления всасывания | $p_{вси} = p_{ни} \pm \Delta p_{вси}$ | МПа               |               |  |  |  |  |  |
| Давление, создаваемое насосом             | $p = p_{ни} \pm p_{вси}$              | МПа               |               |  |  |  |  |  |
| Напор насоса                              | $H = \frac{P}{\rho g}$                | м вод.ст.         |               |  |  |  |  |  |

### Оформление отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- формулировку цели работы;
- схему лабораторной насосной установки, выполненную в соответствии с ГОСТ условных обозначений в трубопроводной системе;
- описание последовательности выполнения работы;
- протокол испытаний;
- сопутствующие расчеты;
- готовую характеристику «напор-подача» центробежного насоса, выполненную на миллиметровке;
- выводы о выполненной работе.

Проанализировать вид характеристики «напор-подача» центробежного насоса, указать типы насосов, работающих по данной характеристике, и перечислить их.

### Лабораторная работа № 3

### СНЯТИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ «НАПОР-ПОДАЧА» ВИНТОВОГО НАСОСА

**Цель работы:** изучить свойства характеристики «напор-подача» винтового насоса; закрепить знания по техническому использованию насоса.

Лабораторная работа выполняется на винтовом насосе: ЭВН 3/5: подача 3 м<sup>3</sup>/ч, напор 5 м вод. ст. частота вращения 940 мин<sup>-1</sup>, мощность привода 2,1 кВт.

В работе также используются измерительные приборы: манометр, мановакуумметр, расходомер, трубопроводы, запорная и регулирующая арматура, емкости.

Принципиальная схема насосной установки для снятия характеристики «напор-подача» ( $H - Q$ ) винтового насоса представлена на рис. 1.

В отличие от центробежного насоса характеристика «напор-подача» винтового насоса представляет собой, чаще всего, прямую линию, проходящую под некоторым углом к оси подач, рис. 2.

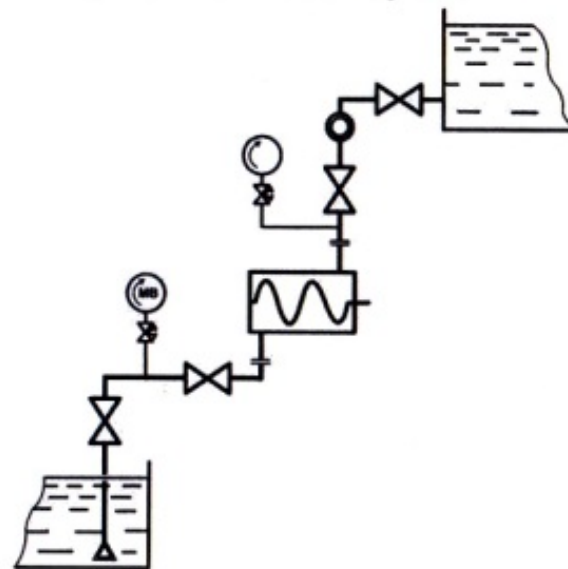


Рис. 1. Принципиальная схема установки для снятия характеристики «напор-подача» винтового насоса

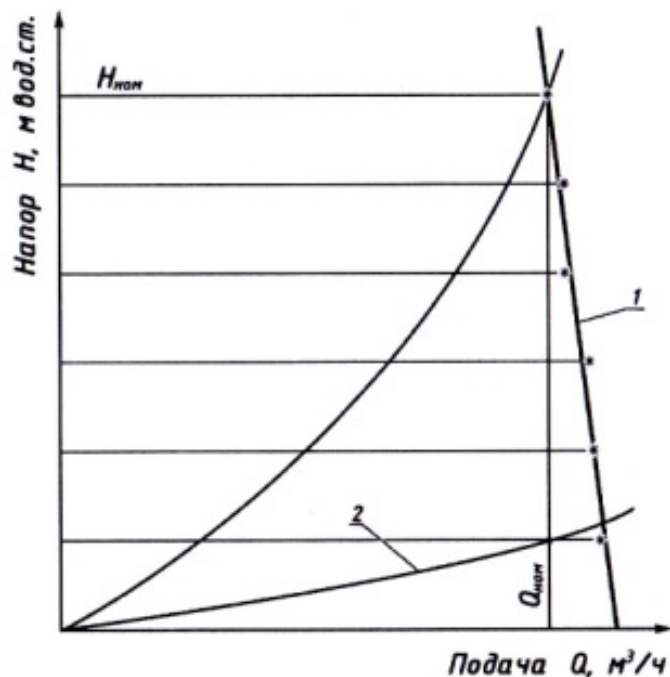


Рис. 2. Интерпретация процесса снятия характеристики «напор-подача» винтового насоса:

(\*) — экспериментальные точки; 1 — характеристика «напор-подача» насоса; 2 — положение характеристики системы после пуска насоса

Отличительной особенностью характеристики является резкое увеличение напора при незначительном изменении подачи, поэтому она получила название жесткая характеристика. Неквалифицированная работа с таким насосом может привести к гидравлическому удару с последующим разрушением контрольно-измерительных приборов, арматуры, насоса или трубопроводов. Поэтому правила для технического использования насосов особо регламентируют ввод в действие насосов объемного типа, к которым относятся и винтовые. Во избежание гидравлического удара при подготовке насосной установки к действию, вначале следует открыть в системе клапаны на нагнетании, а затем остальные.

Испытания по снятию характеристики «напор-подача» винтового насоса на лабораторном стенде проводим следующим образом.

Вводим в действие винтовой насос в соответствии с правилами технической эксплуатации. После пуска насоса характеристика системы занимает самое нижнее положение (рис. 2). В реальных условиях характеристика системы может занимать любое положение в зависимости от гидравлического сопротивления трубопровода.

Путем прикрытия нагнетательного клапана выводим работу насоса на режим паспортного значения напора, что соответствует  $H_{ном}$ . Для его определения используем формулы, приведенные в протоколе испытаний. С помощью расходомера замеряем подачу насоса, соответствующую паспортному значению напора, что соответствует  $Q_{ном}$ .

Полную величину напора насоса делим на равные промежутки через 1 м вод. ст. Путем постепенного открытия нагнетательного клапана в системе снижаем напор насоса на 1 м вод. ст., что необходимо подтвердить расчетом по формулам протокола испытаний. Замеряем на этом режиме подачу и получаем вторую точку, принадлежащую характеристике «напор-подача» винтового насоса.

По аналогии снижая напор насоса через 1 м вод. ст. и замеряя подачу, достигаем состояния полного открытия нагнетательного клапана системы. Дальнейшее изменение параметров насоса невозможно, на этом испытания заканчиваются.

Поскольку каждый режим вывода насоса на новое значение напора сопровождается последующим расчетом, на что затрачивается время, можно не добиваться подбора точных значений напора через 1 м вод. ст., а ограничиться его приблизительными значениями. Эти же значения напора надлежит использовать и при построении графика «напор-подача». На точность результатов такой подход не повлияет.

Возможно проведение испытаний винтового насоса для получения характеристики «напор-подача» от состояния, соответствующего полному открытию клапанов в системе. В этом случае следует добавлять напор по 1 м вод. ст. на каждом режиме работы за счет прикрытия нагнетательного клапана.

### Порядок выполнения работы

1. До начала испытаний следует ознакомиться с правилами техники безопасности, правилами технического использования винтового

насоса и схемой насосной установки, на которой будет выполняться лабораторная работа.

2. Назначить руководителя и распределить обязанности группы (подгруппы) для выполнения лабораторной работы, включающие следующие процедуры:

- подготовка и ввод насосной установки в действие, наблюдение за работой;

- снятие показаний манометра, мановакуумметра и расходомера;
- проверочный расчет величины напора насоса;
- задание режимов работы насоса;
- ведение протокола испытаний.

3. Подготовить насосную установку к действию:

- убедиться, что емкости стенда подготовлены к работе;
- произвести внешний осмотр насоса, электродвигателя, трубопроводов, арматуры, контрольно-измерительных приборов, убедиться в их исправности;

- проверить плотность фланцевых и штуцерных соединений трубопроводов, сальников насоса и клапанов, контрольно-измерительных приборов;

- открыть клапаны системы, необходимые для выполнения лабораторной работы;

- проверить наличие жидкости в насосе и приемном трубопроводе (при необходимости заполнить насос и трубопровод);

- снять поправки к показаниям манометра и мановакуумметра при неработающем насосе и внести их в протокол испытаний.

4. Проверить открытие клапанов на стороне нагнетания насоса, затем на всасывании, запустить насос.

5. Путем прикрытия нагнетательного клапана вывести насос на режим паспортного значения напора, используя для его определения формулы протокола испытаний.

Определение паспортного значения напора расчетным путем по показаниям манометра и мановакуумметра одновременно является проверкой правильности снятия показаний с приборов. Паспортное значение напора и соответствующая ему величина подачи насоса являются первой точкой характеристики «напор-подача».

6. Затем следует снизить напор примерно на 1 м вод. ст., что должно сопровождаться также его расчетом по формулам протокола испытаний, замерить величину подачи. В результате получить следующую экспериментальную точку, принадлежащую характеристике «напор-подача» (рис. 2).

7. Снизить напор насоса еще на 1 м вод. ст. и повторить вышеописанную процедуру определения следующей точки, принадлежащей характеристике «напор-подача».

8. Продолжить снижение напора через 1 м вод. ст. до полного открытия клапана на нагнетание.

9. Результаты замера и расчета внести в таблицу протокола испытаний, на основании которого построить характеристику «напор-подача» винтового насоса. Следует учесть, что если снижение напора происходило при отклонении от рекомендованного, равного 1 м вод. ст., то при построении графика «напор-подача» необходимо использовать те значения напоров, при которых были произведены испытания.

Обработка результатов испытаний при построении характеристики «напор-подача» винтового насоса выполняется по методу наименьших квадратов.

**Протокол испытаний винтового насоса**

| Величина                                  | Обозначение/<br>формула               | Размерность       | Режимы работы |   |   |   |   |
|-------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------|---|---|---|---|
|                                           |                                       |                   | 1             | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Подача в систему                          | $Q$                                   | м <sup>3</sup> /ч |               |   |   |   |   |
| Давление нагнетания                       | $p_n$                                 | МПа               |               |   |   |   |   |
| Поправка к давлению нагнетания            | $\Delta p_n$                          | МПа               |               |   |   |   |   |
| Исправленное значение давления нагнетания | $p_{n.н} = p_n - \Delta p_n$          | МПа               |               |   |   |   |   |
| Давление всасывания                       | $p_{вс}$                              | МПа               |               |   |   |   |   |
| Поправка к давлению всасывания            | $\Delta p_{вс}$                       | МПа               |               |   |   |   |   |
| Исправленное значение давления всасывания | $p_{вс.н} = p_{вс} \pm \Delta p_{вс}$ | МПа               |               |   |   |   |   |
| Давление, создаваемое насосом             | $p = p_{n.н} \pm p_{вс.н}$            | МПа               |               |   |   |   |   |
| Напор насоса                              | $H = \frac{p}{\rho g}$                | м вод. ст.        |               |   |   |   |   |

## Оформление отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- формулировку цели работы;
- схему лабораторной насосной установки, выполненную в соответствии с ГОСТ «Условные обозначения в трубопроводных системах»;
- описание последовательности выполнения работы;
- протокол испытаний;
- сопутствующие расчеты;
- готовую характеристику «напор-подача» винтового насоса, выполненную на миллиметровке;
- выводы о выполненной работе.

Проанализировать вид характеристики «напор-подача» винтового насоса, отметить типы насосов, работающих по данной характеристике и перечислить их.

## Лабораторная работа № 4

### ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

**Цель работы:** изучить свойства суммарной характеристики «напор-подача» при параллельном включении центробежных насосов.

Лабораторная работа выполняется на двух центробежных насосах НЦВ 25/30, имеющих одинаковые напорные характеристики или двух центробежных насосах НЦВ 25/30 и НЦВ 25/20, имеющих разные напорные характеристики. Насос НЦВ 25/30 имеет подачу  $25 \text{ м}^3/\text{ч}$ , напор 30 м вод. ст., частоту вращения  $2860 \text{ мин}^{-1}$ , мощность привода 4,1 кВт, насос НЦВ 25/20 имеет подачу  $25 \text{ м}^3/\text{ч}$ , напор 20 м вод. ст., частоту вращения  $2860 \text{ мин}^{-1}$ , мощность привода 3,1 кВт.

В работе также используются: измерительные приборы: манометр, мановакуумметр, расходомер, трубопроводы, запорная и регулирующая арматура, емкости.

Принципиальная схема параллельной работы центробежных насосов приведена на рис. 1. Под параллельной работой понимают работу двух и более насосов на один общий трубопровод. Условия на всасы-

вании могут быть разными: каждый насос откачивает жидкость либо из своего резервуара, либо из общего.

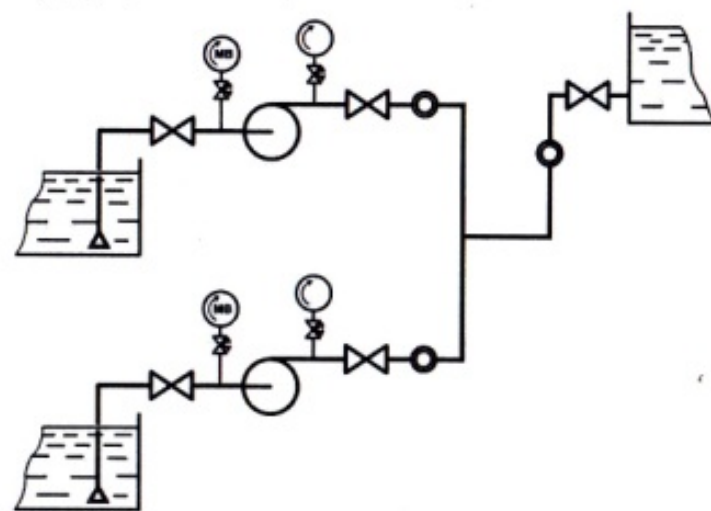


Рис. 1. Принципиальная схема параллельной работы двух центробежных насосов

При параллельной работе могут использоваться насосы с одинаковыми и разными характеристиками «напор-подача».

При графическом построении параллельной работы двух и более насосов, имеющих как одинаковые, так и разные характеристики, следует складывать подачи по линии равных напоров. Для получения суммарной характеристики складываемые характеристики «напор-подача» насосов должны быть предварительно построены в одинаковых масштабах как по линии напоров, так и по линии подачи.

На рис. 2 а приведено построение суммарной характеристики двух параллельно работающих насосов, имеющих одинаковые характеристики «напор-подача». Для сложения характеристик используют вспомогательные линии, проведенные параллельно оси подачи и пересекающие характеристики складываемых насосов. На вспомогательных линиях равных напоров удваивают значения подачи насосов.

На рис. 2 б показано построение суммарной характеристики двух параллельно работающих насосов, имеющих разные характеристики «напор-подача». Графическое построение выполняется аналогично вышеописанному, но характеристика насоса, имеющего меньший

напор, складывается с характеристикой насоса, имеющего больший напор.

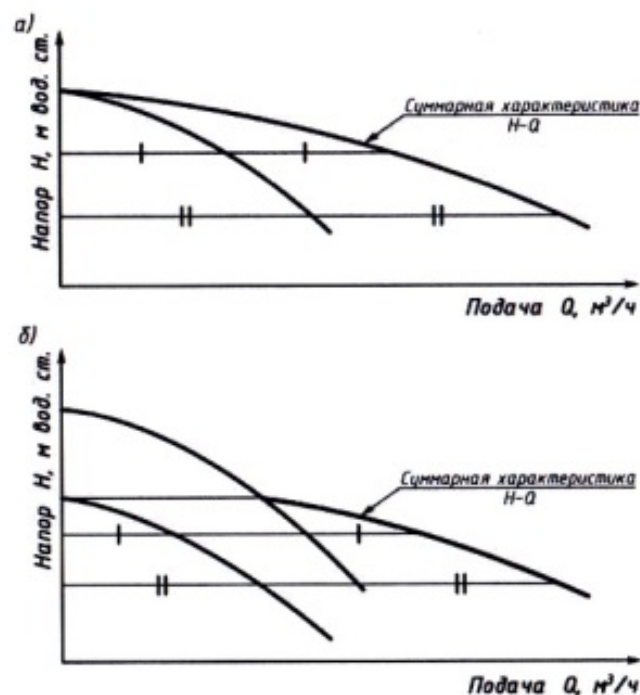


Рис. 2. Принцип сложения характеристик центробежных насосов при параллельной работе в координатах  $H-Q$ :  
 а — при одинаковых напорных характеристиках;  
 б — при разных напорных характеристиках; (отрезки, помеченные одинаковыми штрихами, равны)

Выполненное построение суммарной характеристики подобно переносу характеристики насоса, имеющего меньший напор, вдоль линий равных напоров.

При выполнении лабораторной работы и параллельном включении двух насосов с одинаковыми характеристиками «напор-подача» можно сразу снимать суммарную характеристику. Суммарный напор насосов определяется по показаниям манометра и мановакуумметра одного из включенных насосов, а подача — по суммирующему расходомеру. Количество экспериментальных точек должно быть не менее шести. Подача на каждом режиме определяется путем деления суммарной подачи двух работающих насосов в номинальном (паспортном) режиме на

число принятых экспериментальных точек, первой из которых является режим холостого хода.

Для лучшего усвоения результатов эксперимента необходимо полученную суммарную характеристику «напор-подача», дополнить характеристикой одного из насосов. Для этого можно воспользоваться следующими приемами:

- применить действие, обратное построению суммарной напорной характеристики, поделить пополам величины подач, охватываемых суммарной характеристикой. Деление подач производится на линиях равных напоров. Точки деления подач следует соединить, что будет соответствовать напорной характеристике одного из двух насосов;
- воспользоваться ранее снятой характеристикой «напор-подача» насоса и нанести ее на полученный при эксперименте график;
- провести дополнительные испытания и вновь снять характеристику «напор-подача» насоса, нанеся ее график.

Построение суммарной характеристики «напор-подача» двух насосов с разными напорными характеристиками имеет некоторые особенности. Первоначально следует снять характеристику «напор-подача» насоса, имеющего больший напор, затем включить в параллель насос с меньшим напором. В результате суммарная характеристика будет представлена двумя составляющими: первая характеристика «напор-подача» насоса с большим напором, вторая — с меньшим. После включения второго насоса напор в системе будет общим для обоих насосов. На каждом режиме замеряется напор насосов и подача по суммирующему расходомеру.

Известно, что для получения напорной характеристики одного центробежного насоса минимальное количество экспериментальных точек должно быть не менее пяти. Поскольку испытания параллельной работы насосов с разными напорными характеристиками проводятся последовательно, сначала одного, а затем другого насоса, требуемое количество экспериментальных точек должно быть не менее десяти. Таким образом, по сравнению с вариантом испытаний параллельной работы с двумя одинаковыми напорными характеристиками эксперимент с разными характеристиками насосов более трудоемок (примерно в два раза).

Одновременное включение насосов, имеющих разные напорные характеристики, при проведении испытаний не рекомендуется, так как насос с большим напором «запирает» насос с меньшим. В результате последний не подает жидкость в систему. Это явление будет происходить до условия равенства напора насоса с большим напором напору холостого хода насоса с меньшим напором, т.е. в течение всего периода снятия характеристики «напор-подача» насоса с большим напором. За этот период «запертая» в рабочей полости насоса жидкость будет нагреваться, и насос может вступить в режим кавитации, способствующий ускоренному износу проточной части. При переходе на следующую режимную точку, после отмеченного ранее равенства напоров, второй насос начинает подавать жидкость в систему, работая одновременно с первым, что будет продолжаться до полного снятия характеристики «напор-подача» второго насоса.

В условиях эксплуатации одновременное включение в параллель двух центробежных насосов, имеющих разные напорные характеристики нужно избегать вышеописанного явления записывания насоса с меньшим напором, когда последний не подает жидкость в систему.

#### **Порядок выполнения работы**

1. Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с правилами техники безопасности, с правилами технического использования центробежного насоса и схемой насосной установки, на которой будет выполняться лабораторная работа.

2. Назначить руководителя и распределить обязанности группы (подгруппы) для выполнения лабораторной работы, включающие:

- подготовку и ввод насосной установки в действие, наблюдение за работой;
  - снятие показаний манометра, мановакуумметра и расходомера;
  - проверочный расчет величины напора насоса;
  - задание режимов работы насоса;
  - ведение протокола испытаний.
4. Подготовить насосную установку к действию следующим образом:
- убедиться, что емкости стенда подготовлены к работе;

– произвести внешний осмотр насоса, электродвигателя, трубопроводов, арматуры, контрольно-измерительных приборов, убедиться в их исправности;

– проверить плотность фланцевых и штуцерных соединений трубопроводов, сальников насоса и клапанов, контрольно-измерительных приборов;

– открыть клапаны системы, необходимые для выполнения лабораторной работы;

– проверить наличие жидкости в насосе и приемном трубопроводе, при необходимости заполнить насос и трубопровод;

– снять поправки к показаниям манометра и мановакуумметра при неработающем насосе и внести их в протокол испытаний.

Лабораторная работа выполняется по одному из вариантов: параллельная работа двух центробежных насосов либо с одинаковыми напорными характеристиками, либо с разными.

#### **Параллельная работа двух центробежных насосов с одинаковыми напорными характеристиками**

##### *Алгоритм действий*

1. Поочередно запустить оба центробежных насоса при закрытых нагнетательных клапанах.

2. Снять показания манометра и мановакуумметра на режиме холостого хода (при нулевой подаче).

3. Выполнить проверку правильности снятия показаний манометра и мановакуумметра. Для этого необходимо по формулам, приведенным в таблице протокола испытаний, рассчитать напор насоса на режиме холостого хода. Его значение должно быть примерно 35 м вод. ст. Если указанное равенство выдержано, то можно продолжить выполнение лабораторной работы. В противном случае необходимо найти ошибку и только после этого продолжить выполнение работы.

4. Напор холостого хода является первой точкой суммарной характеристики «напор-подача». Для получения других точек делим суммарную номинальную подачу двух работающих насосов, равную 50 м<sup>3</sup>/ч, на участки, кратные 10 м<sup>3</sup>/ч. Таким образом, вторая точка суммарной характеристики «напор-подача» будет получена при 10 м<sup>3</sup>/ч, третья — при 20 м<sup>3</sup>/ч и т. д. Подачу, равную 10 м<sup>3</sup>/ч, устанавливаем

путем постепенного открытия нагнетательного клапана на общем для обоих насосов участке трубопровода (за точкой соединения подач от обоих насосов).

#### Протокол испытаний параллельной работы центробежных насосов

| Величина                                  | Обозначение/<br>формула               | Размерность       | Режимы работы |   |   |   |   |   |
|-------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------|---|---|---|---|---|
|                                           |                                       |                   | 1             | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Подача в систему                          | $Q$                                   | м <sup>3</sup> /ч |               |   |   |   |   |   |
| Поправка к показаниям манометра           | $\Delta p_n$                          | МПа               |               |   |   |   |   |   |
| Поправка к показаниям мановакуумметра     | $\Delta p_{вс}$                       | МПа               |               |   |   |   |   |   |
| Давление нагнетания                       | $p_n$                                 | МПа               |               |   |   |   |   |   |
| Давление всасывания                       | $p_{вс}$                              | МПа               |               |   |   |   |   |   |
| Исправленное значение давления нагнетания | $P_{н.и} = p_n - \Delta p_n$          | МПа               |               |   |   |   |   |   |
| Исправленное значение давления всасывания | $P_{вс.и} = p_{вс} \pm \Delta p_{вс}$ | МПа               |               |   |   |   |   |   |
| Давление, создаваемое насосом             | $p = p_{н.и} \pm p_{вс.и}$            | МПа               |               |   |   |   |   |   |
| Напор насоса                              | $H = \frac{p}{\rho g}$                | м вод. ст.        |               |   |   |   |   |   |

5. Таким же способом установить подачу 20 м<sup>3</sup>/ч и т. д. до полного открытия нагнетательного клапана на общем участке трубопровода. На каждом режиме произвести замер давлений на всасывании и на нагнетании одного из работающих насосов. Результаты занести в таблицу протокола испытаний. Далее на каждом режиме рассчитать суммарный напор по двум параметрам: подаче и напору, а также по данным протокола испытаний построить суммарную напорную характеристику двух центробежных насосов.

6. Для получения характеристики одного из насосов необходимо использовать любой из методов, приведенных во введении к лабораторной работе.

7. Нанести на полученную суммарную напорную характеристику двух параллельно включенных насосов характеристику системы, для которой известны две точки: нулевая и при полной подаче двух работающих насосов.

Для получения промежуточной (третьей) точки необходимо остановить один из работающих насосов и снять параметры рабочей точки при полностью открытых клапанах на системе. Расчет напора производится по методике, приведенной в таблице протокола испытаний.

Через полученные три рабочие точки провести характеристику системы, которая должна иметь вид параболы (рис. 3). Если указанная закономерность нарушена, то необходимо найти ошибку.

Из приведенного рис. 3 следует, что суммарная подача параллельно работающих насосов (рабочая точка 1) меньше суммы подач при индивидуальной работе (рабочая точка 1'):  $Q_{1+2} < Q_1 + Q_2$  — это объясняется тем, что гидравлическое сопротивление, пропорциональное квадрату расхода, увеличивается при переходе от индивидуальной работы насоса к параллельной. Для любой рабочей точки, расположенной на суммарной напорной характеристике, справедливо равенство подач и напоров каждого работающего насоса. Линия, проведенная через рабочую точку 1 (см. рис. 3) параллельно оси подач (линия постоянного напора), делится пополам индивидуальной напорной характеристикой насоса,  $Q_1 = Q_2$ .

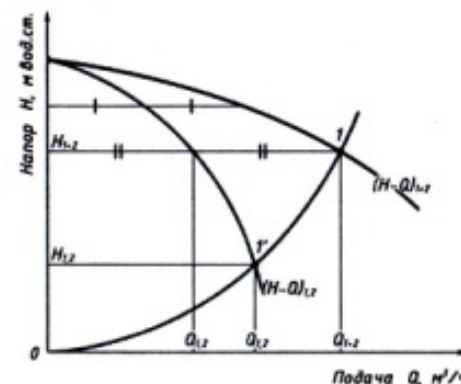


Рис. 3. Графическая интерпретация параллельной работы двух центробежных насосов с одинаковыми напорными характеристиками  
Рабочие точки: 1 — двух параллельно включенных насосов;  
1' — одного насоса

## Параллельная работа двух центробежных насосов с разными напорными характеристиками

### Алгоритм действий

1. Снять поправки к показаниям манометра и мановакуумметра.
2. Запустить центробежный насос с большей напорной характеристикой при закрытом нагнетательном клапане.
3. Снять показания манометра и мановакуумметра на режиме холостого хода (при нулевой подаче).
4. Выполнить проверку правильности снятия показаний манометра и мановакуумметра. Для этого необходимо по формулам, приведенным в протоколе испытаний, рассчитать напор насоса на режиме холостого хода. Его значение должно быть примерно равно 35 м вод. ст. Если указанное равенство соблюдается, то можно продолжить выполнение лабораторной работы. Если не соблюдается, то необходимо найти ошибку и только после этого продолжить выполнение работы.

5. Напор холостого хода является первой точкой суммарной характеристики «напор-подача». Для получения других точек делим суммарную номинальную подачу двух работающих насосов, равную  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ , на участки, кратные  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Таким образом, вторая точка суммарной характеристики «напор-подача» будет получена при  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ , третья — при  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$  и т. д. Подачу, равную  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ , устанавливаем путем постепенного открытия нагнетательного клапана за насосом. Таким же способом устанавливаем подачу  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$  и т.д. до полного открытия нагнетательного клапана за насосом. Параметры последней точки превышают номинальную подачу насоса, равную  $25 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

6. Далее необходимо ввести в действие центробежный насос с меньшим напором при закрытом нагнетательном клапане, измерить напор холостого хода. Переход на следующий режим сопровождается увеличением суммарного напора и уменьшением суммарной подачи. Медленно открывая нагнетательный клапан, установить подачу насосов, кратную  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Продолжить испытания, прибавляя к суммарной подаче работающих насосов по  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$  для каждой экспериментальной точки. Испытания заканчиваются при достижении полного открытия нагнетательного клапана насоса с меньшей напорной характеристикой.

7. На каждом режиме произвести замер давлений на всасывании и на нагнетании работающих насосов. Результаты занести в таблицу протокола испытаний. Далее на каждом режиме рассчитать напор.

8. По двум параметрам: подаче и напору, построить суммарную напорную характеристики двух насосов (см. рис. 4).

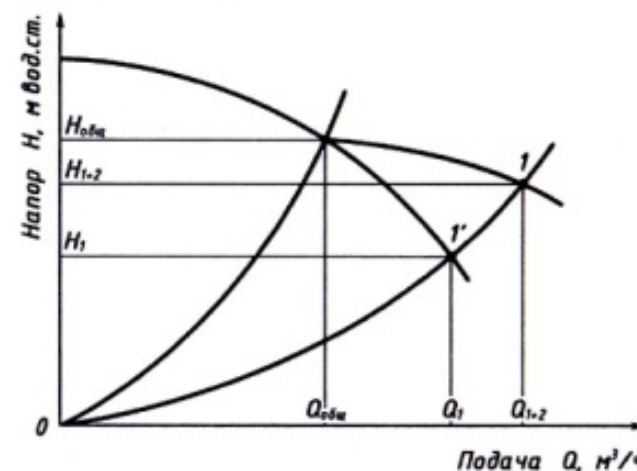


Рис. 4. Графическая интерпретация параллельной работы двух центробежных насосов с разными напорными характеристиками  
Рабочие точки: 1 — двух параллельно включенных насосов,  
1' — одного насоса с большим напором

9. Нанести на полученную суммарную напорную характеристику двух разных центробежных насосов характеристику системы по трем рабочим точкам. Первая из них совпадает с нулевым значением напора и подачи, так как на лабораторном стенде отсутствует статическая составляющая потеря напора. Вторая рабочая точка 1' (см. рис.4) характеризуется работой насоса с большей напорной характеристикой при полностью открытом нагнетательном клапане. Третья рабочая точка 1 (см. рис. 4). имеет параметры насоса с меньшим напором при полностью открытых нагнетательных клапанах на обоих насосах.

Построенная по трем рабочим точкам характеристика системы должна иметь вид параболы, если она имеет излом, то необходимо найти ошибку.

В окончательном виде параллельная работа двух центробежных насосов с разными напорными характеристиками имеет вид рис. 4.

Из результатов лабораторной работы следует, что при параллельном включении двух центробежных насосов с разными напорными характеристиками работа насоса с меньшей напорной характеристикой оказывает влияние на суммарную подачу насосов только после достижения напора  $H_{\text{общ}}$ . До этого момента насос с меньшей напорной характеристикой «заперт» (не подает жидкость в систему) напором от работающего насоса с большей напорной характеристикой. Поэтому на участке подачи от 0 до  $Q_{\text{общ}}$  включение насоса с меньшей напорной характеристикой не имеет смысла.

При общей рабочей точке, расположенной на участке, где  $Q > Q_{\text{общ}}$  распределение подачи между работающими насосами неравномерно, насос с большим напором дает большую подачу, а с меньшим — меньшую.

### Оформление отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- формулировку цели работы;
- схему лабораторной насосной установки, выполненную в соответствии с ГОСТ «Условные обозначения в трубопроводных системах»;
- описание последовательности выполнения работы;
- протокол испытаний;
- сопутствующие расчеты;
- график параллельной работы двух центробежных насосов в координатах  $H-Q$ ;
- выводы о выполненной работе.

В выводах следует изложить принцип сложения напорных характеристик при параллельном включении насосов, относительное приращение подачи и напора при включении следующего насоса на параллельную работу, распределение подачи между параллельно работающими насосами и отметить какие типы насосов можно включать в параллельную работу.

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ РАБОТА ДВУХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

**Цель работы:** изучить свойства суммарной характеристики «напор-подача» при последовательном включении центробежных насосов.

Лабораторная работа выполняется на двух центробежных насосах НЦВ 25/30, имеющих одинаковые напорные характеристики, или двух центробежных насосах НЦВ 25/30 и НЦВ 25/20, имеющих разные напорные характеристики. Насос НЦВ 25/30 имеет подачу  $25 \text{ м}^3/\text{ч}$ , напор 30 м вод. ст. — частоту вращения  $2860 \text{ мин}^{-1}$ , мощность привода 4,1 кВт, насос НЦВ 25/20 имеет подачу  $25 \text{ м}^3/\text{ч}$ , напор 20 м вод. ст., частоту вращения  $2870 \text{ мин}^{-1}$ , мощность привода 3,1 кВт.

В работе также используются: измерительные приборы: манометр, мановакуумметр, расходомер, трубопроводы, запорная и регулирующая арматура, емкости.

Принципиальная схема последовательной работы двух центробежных насосов приведена на рис. 1.

В общем случае под последовательной работой двух и более насосов понимают такое их соединение, когда первый насос принимает жидкость из емкости и подает ее на вход следующего. Затем каждый насос подает жидкость с нагнетательной стороны на всасывание следующего. Последний в соединении насос подает жидкость по назначению.

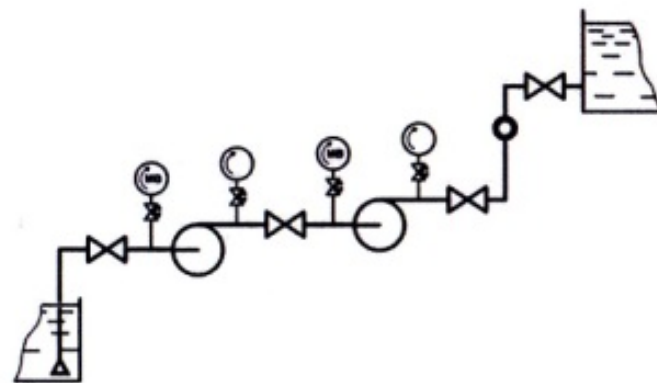


Рис. 1. Принципиальная схема последовательного включения двух центробежных насосов

При последовательной работе могут использоваться насосы как одинаковые, так и разные по паспортным напорным характеристикам.

При графическом построении суммарной напорной характеристики двух и более насосов, имеющих как одинаковые, так и разные характеристики, следует складывать напоры по линии равных подач. Для получения суммарной характеристики складываемые характеристики «напор-подача» насосов должны быть предварительно построены в одинаковых масштабах как по линии подач, так и по линии напоров.

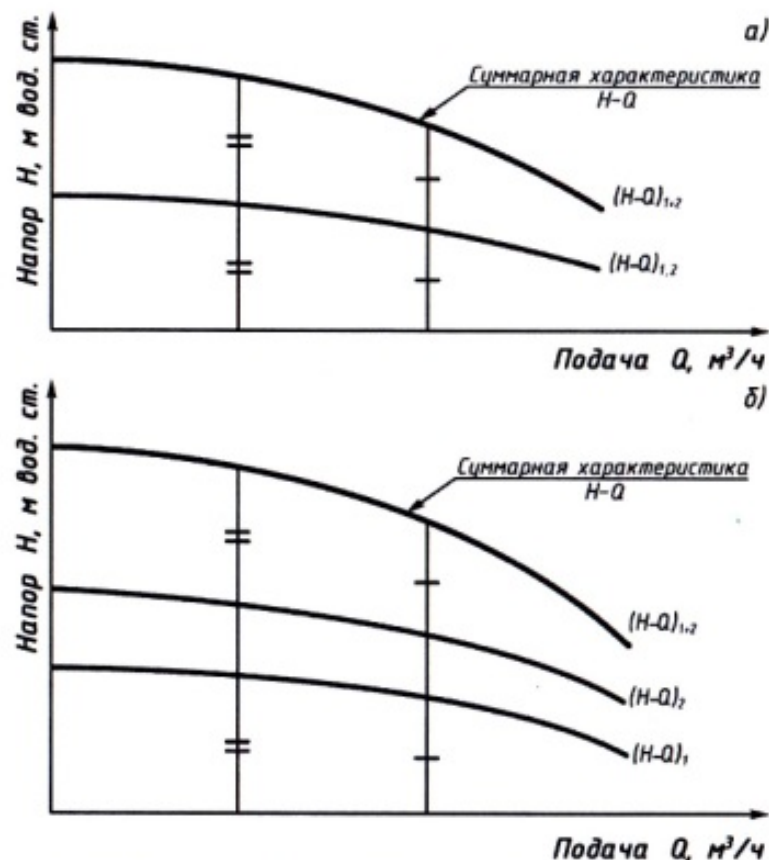


Рис. 2. Принцип сложения характеристик двух центробежных насосов при последовательном соединении:

- а) при одинаковых напорных характеристиках;
  - б) при разных напорных характеристиках;
- (отрезки, помеченные одинаковыми штрихами, равны)

На рис. 2 а приведено построение суммарной характеристики двух последовательно включенных насосов, имеющих одинаковые характеристики «напор-подача». Для сложения характеристик используют вспомогательные линии во всем диапазоне подач, проведенные параллельно оси напоров и пересекающие характеристики складываемых насосов.

На рис. 2 б приведено построение суммарной характеристики двух последовательно включенных насосов, имеющих разные характеристики «напор-подача». Графическое построение выполняется аналогично вышеприведенному. На вспомогательных линиях равных подач складывают значения напоров насосов, имеющих разные характеристики.

При последовательном включении насосов напор от первого насоса поступает на вход следующего. Давление, создаваемое первым насосом, может превысить предельные показания мановакуумметра и вывести его из действия. Поэтому перед выполнением лабораторной работы мановакуумметр второго насоса следует отключить. Для любой заданной подачи напор, создаваемый первым насосом, будет равен разности давлений нагнетания и всасывания с учетом поправок на начальные показания приборов. Напор второго насоса равен разности давлений нагнетания, замеряемого на выходе насоса и всасывания, которым является напор, создаваемый первым насосом. Указанные точки замера позволяют снять одновременно характеристику первого, второго насосов и суммарную.

Этот метод пригоден для снятия суммарной характеристики при последовательном соединении как для одинаковых, так и разных напорных характеристик насосов.

#### Порядок выполнения работы

1. Перед началом испытаний необходимо ознакомиться с правилами техники безопасности, с правилами технического использования центробежного насоса и схемой насосной установки, на которой будет выполняться лабораторная работа.

2. Назначить из числа обучающихся руководителя для выполнения лабораторной работы.

3. Распределить обязанности группы (подгруппы) для выполнения лабораторной работы, включающие следующее:

- подготовка и ввод насосной установки в действие, наблюдение за работой;

- снятие показаний манометра, мановакуумметра и расходомера;
- проверочный расчет величины напора насоса
- задание режимов работы насоса;
- ведение протокола испытаний.

4. Подготовить насосную установку к действию:

- убедиться, что емкости стенда подготовлены к работе;
- произвести внешний осмотр насоса, электродвигателя, трубопроводов, арматуры, контрольно-измерительных приборов, убедиться в их исправности;

- проверить плотность фланцевых и штуцерных соединений трубопроводов, сальников насоса и клапанов, контрольно-измерительных приборов;

- открыть клапаны в системе, необходимые для выполнения лабораторной работы;

- проверить наличие жидкости в насосе и приемном трубопроводе (при необходимости заполнить насос и трубопровод);

- снять поправки к показаниям манометра и мановакуумметра при неработающем насосе и внести их в протокол испытаний.

5. Поочередно запустить насосы, предназначенные для выполнения лабораторной работы при закрытых нагнетательных клапанах на индивидуальную работу, снять показания манометров и мановакуумметров в режиме холостого хода.

6. Выполнить проверку правильности снятия показаний манометра и мановакуумметра. Для этого необходимо по формулам, приведенным во введении к лабораторной работе, рассчитать напор насоса на режиме холостого хода. Их значение должно быть примерно равно 35 м вод. ст. — для насоса НЦВ 25/30 и 25 м вод. ст. для насоса — НЦВ 25/20. Если указанное равенство выдержано, то можно продолжать лабора-

торную работу, если нет — необходимо найти ошибку и только после этого продолжить выполнение работы.

7. Сумма напоров холостого хода является первой точкой суммарной характеристики «напор-подача» последовательно работающих центробежных насосов. Для получения других точек делим номинальную подачу одного насоса на участки, кратные  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Таким образом, вторая точка суммарной характеристики «напор-подача» будет получена при  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ , третья — при  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$  и т. д.

8. Выводим насосы с индивидуального режима на последовательную работу. Для этого с режима холостого хода выводим насосы на режим индивидуальной работы при половинном открытии нагнетательных клапанов. Производим переключение на последовательную работу насосов:

- отключаем мановакуумметр второго насоса;

- медленно полностью открываем клапан подачи с нагнетания первого насоса на прием второго и одновременно медленно закрываем клапан приема ко второму насосу;

- медленно открываем полностью нагнетательный клапан второго насоса;

- медленно полностью закрываем нагнетательный клапан первого насоса.

После указанных переключений насосы работают последовательно на полной подаче.

9. Далее путем частичного открытия нагнетательного клапана второго насоса устанавливаем первый режим работы  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ , затем  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$  и т. д. до полного открытия нагнетательного клапана.

На всех режимах последовательной работы центробежных насосов нельзя полностью закрывать нагнетательные клапаны (за насосом и общий). Их полное закрытие на лабораторном стенде приведет к гидравлическому удару.

10. На каждом режиме производим замер давлений на всасывании и нагнетании работающих насосов. Результаты замера вносятся в протокол испытаний. На каждом режиме рассчитывается напор насосов. По двум параметрам: подаче и напору, по данным протокола испыта-

ний строят суммарную напорную характеристику двух центробежных насосов.

11. Наносим на полученную суммарную напорную характеристику последовательной работы двух центробежных насосов характеристику системы, для которой известны две точки: нулевая и при полной подаче (последняя из замеренных в эксперименте точек).

Для определения промежуточной точки характеристики системы можно использовать соотношение

$$H_c = H_{ст} + RQ^2,$$

где  $H_c$  — напор, потребляемый системой;  $H_{ст}$  — статическая составляющая потерь напора для лабораторного стенда  $H_{ст} = 0$ ;  $Q$  — подача;  $R$  — обобщенное сопротивление.

Для рабочей точки  $I$  справедливо соотношение

$$H_I = RQ_I^2, \quad (*)$$

где  $H_I$  — напор в рабочей точке  $I$ ;  $Q_I$  — подача в рабочей точке  $I$ .

Из соотношения (\*) имеем

$$R = \frac{H}{Q^2}$$

12. Исходя из предположения, что при испытаниях на рабочих режимах подач (от 30 до 100 %) сохраняется турбулентный режим движения жидкости, величина  $R$  остается постоянной. Поэтому используем величину  $R$  для определения напора, потребляемого системой на рабочих диапазонах подач.

13. Находим величину напора, потребляемого системой при половинной подаче насоса, и используем ее для построения характеристики системы.

14. По точкам нулевой, полной подачи насоса и одной промежуточной наносим характеристику системы на рис. 3 работы двух центробежных насосов при последовательном включении.

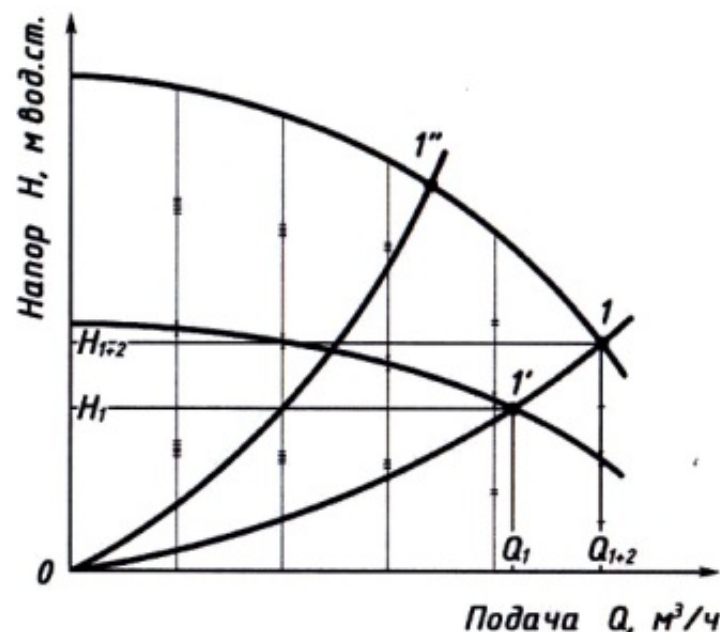


Рис. 3. Интерпретация последовательной работы двух центробежных насосов в координатах  $H - Q$ . Рабочие точки:

- 1 — при работе двух последовательно включенных насосов;
- 1' — при работе одного насоса; 1'' — при работе двух последовательно включенных насосов и дроссельном регулировании подачи

Из результатов лабораторной работы следует, что при последовательном включении двух центробежных насосов происходит прирост подачи равный  $\Delta Q = Q_{1+2} - Q_1$  и прирост напора,  $\Delta H = \Delta H_{1+2} - H_1$ . Причем в реальной системе удвоение напора не наблюдается, что объясняется гидравлическим сопротивлением системы. Удвоения общего напора не происходит и при снижении подачи насосов дросселированием (см. рабочую точку  $1''$  рис. 3), оно будет соблюдаться только для режима холостого хода.

Аналогичные выводы следуют при последовательном включении двух центробежных насосов с разными напорными характеристиками.

**Протокол испытаний двух последовательно включенных насосов  
(Первый насос)**

| Величина                         | Обозначение/<br>формула              | Размерность       | Режимы работы |   |   |   |   |
|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------|---------------|---|---|---|---|
|                                  |                                      |                   | 1             | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Подача в систему                 | $Q$                                  | м <sup>3</sup> /ч |               |   |   |   |   |
| Поправка к давлению всасывания   | $\Delta p_{вс}$                      | МПа               |               |   |   |   |   |
| Поправка к давлению нагнетания   | $\Delta p_{н1}$                      | МПа               |               |   |   |   |   |
| Давление всасывания              | $p_{вс}$                             | МПа               |               |   |   |   |   |
| Давление нагнетания              | $p_{н1}$                             | МПа               |               |   |   |   |   |
| Исправленное давление всасывания | $p_{всн} = p_{вс} \pm \Delta p_{вс}$ | МПа               |               |   |   |   |   |
| Исправленное давление нагнетания | $p_{н1н} = p_{н1} - \Delta p_{н1}$   | МПа               |               |   |   |   |   |
| Давление, создаваемое насосом    | $p = p_{н1н} \pm p_{всн}$            | МПа               |               |   |   |   |   |
| Напор насоса                     | $H_1 = \frac{P_1}{\rho g}$           | м вод. ст.        |               |   |   |   |   |

**Протокол испытаний двух последовательно включенных насосов  
(Второй насос)**

| Величина                         | Обозначение/<br>формула              | Размерность       | Режимы работы |   |   |   |   |
|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------|---------------|---|---|---|---|
|                                  |                                      |                   | 1             | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Подача в систему                 | $Q$                                  | м <sup>3</sup> /ч |               |   |   |   |   |
| Поправка к давлению всасывания   | $\Delta p_{вс} = \Delta p_{н1}$      | МПа               |               |   |   |   |   |
| Поправка к давлению нагнетания   | $\Delta p_{н2}$                      | МПа               |               |   |   |   |   |
| Давление всасывания              | $p_{вс} = p_{н1}$                    | МПа               |               |   |   |   |   |
| Давление нагнетания              | $p_{н2}$                             | МПа               |               |   |   |   |   |
| Исправленное давление всасывания | $p_{всн} = p_{н1} \pm \Delta p_{н1}$ | МПа               |               |   |   |   |   |
| Исправленное давление нагнетания | $p_{н2н} = p_{н2} - \Delta p_{н2}$   | МПа               |               |   |   |   |   |
| Давление, создаваемое насосом    | $p_2 = p_{н2н} \pm p_{всн}$          | МПа               |               |   |   |   |   |
| Напор насоса                     | $H_2 = \frac{P_2}{\rho g}$           | м вод. ст.        |               |   |   |   |   |
| Суммарный напор насосов          | $\Sigma H = H_1 + H_2$               | м вод. ст.        |               |   |   |   |   |

**Оформление отчета**

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- формулировку цели работы;
- схему лабораторной насосной установки, выполненную в соответствии с ГОСТ «Условные обозначения в трубопроводных системах»;
- описание последовательности выполнения работы;
- таблицу протокола испытаний;
- сопутствующие расчеты;
- график последовательной работы двух центробежных насосов в координатах  $H-Q$ ;
- выводы о выполненной работе.

В выводах следует изложить объяснение принципа сложения характеристики насосов при последовательной работе, оценку реальной добавки напора при сложении характеристики, перечислить типы насосов, которые могут работать при последовательном включении.

**Лабораторная работа № 6**

**РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОДАЧИ  
ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА ДРОССЕЛИРОВАНИЕМ**

**Цель работы:** изучить процесс регулирования подачи центробежного насоса дросселированием.

Лабораторная работа выполняется на центробежном насосе, оборудованном перепускным трубопроводом, так как его напорная характеристика потребуется далее при выполнении лабораторной работы по регулированию центробежного насоса перепуском.

При выполнении лабораторной работы используются: центробежный насос с паспортными данными: подача  $Q = 25$  м<sup>3</sup>/ч, напор  $H = 20$  м вод. ст., частота вращения  $n = 2780$  мин<sup>-1</sup>, мощность привода  $N = 3,1$  кВт; измерительные приборы: манометр, мановакуумметр, расходомер; трубопроводы, запорная арматура, емкости.

Принципиальная схема регулирования подачи центробежного насоса дросселированием приведена на рис. 1.

Регулирование подачи центробежного насоса дросселированием на лабораторном стенде осуществляется изменением положения (при-

крытием) нагнетательного клапана. С увеличением степени прикрытия нагнетательного клапана подача и напор насоса уменьшаются.

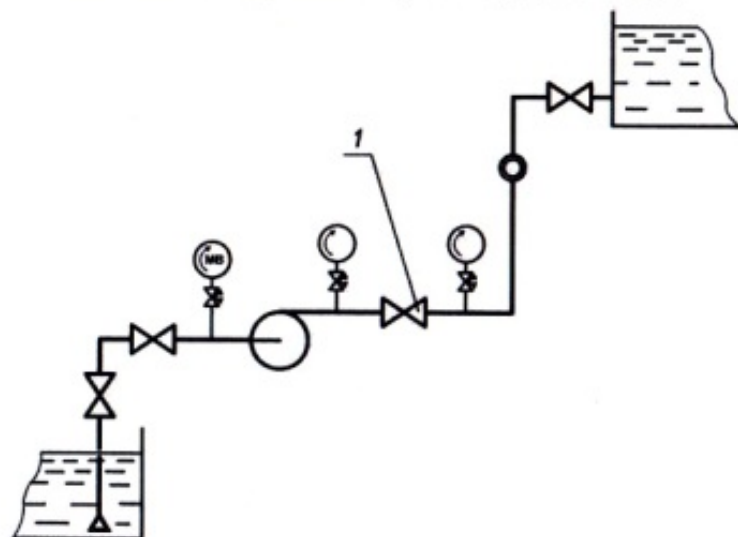


Рис. 1. Принципиальная схема регулирования подачи центробежного насоса дросселированием:  
1 – нагнетательный (регулирующий) клапан

Интерпретация принципа регулирования центробежного насоса дросселированием в координатах «напор-подача» приведена на рис. 2.

Рабочая точка 1 на рис. 2 получена при полном открытии клапанов на системе. Этому положению соответствует характеристика системы 5-1.

Постепенно увеличивая степень прикрытия нагнетательного клапана, переходим в рабочие точки 1', 1'' и 1''', которые лежат на характеристике «напор-подача» насоса. Этим новым режимам соответствуют характеристики системы 5-1', 5-1'' и 5-1'''. Опуская перпендикуляры из рабочих точек 1', 1'' и 1''' на ось подач, получим рабочие точки 2, 3 и 4 на характеристике системы, с параметрами которых жидкость поступает по назначению. Разность напоров в парах точек 1'-2, 1''-3, 1'''-4 равна величине потерь напора на нагнетательном клапане при регулировании.

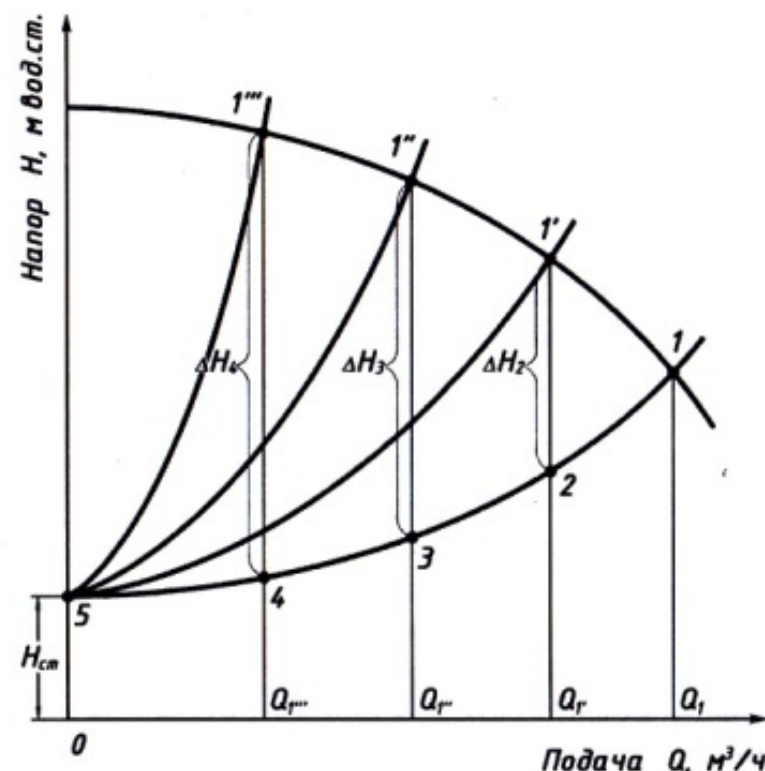


Рис. 2. Интерпретация принципа регулирования подачи центробежного насоса дросселированием:

- 1 – рабочая точка системы;
- 1', 1'', 1''' – рабочие точки при дросселировании;
- 2, 3, 4 – действительные рабочие точки системы;
- 1'-2, 1''-3, 1'''-4 – потери напора на нагнетательном (дроссельном) клапане

Следовательно, при переходе на каждый следующий режим, сопровождающийся увеличением сопротивления нагнетательного клапана, получаем уменьшение подачи и напора насоса. Таким образом, регулирование подачи центробежного насоса дросселированием осуществляется за счет изменения характеристики системы при неизменной характеристике «напор-подача» насоса.

## Порядок выполнения работы

1. Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с правилами техники безопасности, правилами технического использования центробежного насоса и схемой насосной установки, на которой будет выполняться лабораторная работа.

2. Назначить руководителя для выполнения лабораторной работы.

3. Распределить обязанности группы (подгруппы) для выполнения лабораторной работы, включающие следующее:

- подготовку и ввод насосной установки в действие, наблюдение за работой;

- снятие показаний манометра, мановакуумметра и расходомера;

- проверочный расчет величины напора насоса;

- задание режимов работы насоса;

- ведение протокола испытаний.

4. Подготовить насосную установку к действию:

- убедиться, что емкости стенда подготовлены к работе и заполнены водой;

- произвести внешний осмотр насоса, электродвигателя, арматуры, контрольно-измерительных приборов и убедиться в их исправности;

- проверить плотность фланцевых и штуцерных соединений трубопроводов, сальников насоса и клапанов, контрольно-измерительных приборов;

- открыть на системе клапаны, необходимые для выполнения лабораторной работы;

- проверить наличие жидкости в насосе и приемном трубопроводе, при необходимости их заполнить;

- снять поправки к показаниям манометра и мановакуумметра и внести их в протокол испытаний.

5. Запустить центробежный насос при закрытом нагнетательном клапане. Медленно полностью открыть нагнетательный клапан и вывести насос на установившийся режим.

6. Снять показания манометра и мановакуумметра для определения рабочей точки 1 (см. рис. 2).

7. Выполнить проверку правильности снятия показаний контрольно-измерительных приборов, используемых в работе, и методику ее проведения. Для этого по формулам, приведенным в таблице протокола испытаний, рассчитать напор насоса в рабочей точке 1. Значения замеренной по расходомеру подачи и рассчитанного напора насоса в рабочей точке 1 должны быть примерно равны паспортным параметрам подачи и напора насоса. Если это равенство соблюдается, можно продолжить работу. В случае несоответствия замеренных параметров паспортным данным насоса необходимо найти ошибку и только после этого продолжить выполнение лабораторной работы.

Подачу на участке от нуля до рабочей точки 1 делим примерно на равные участки для того, чтобы получить три рабочие точки. Далее прикрываем нагнетательный клапан и устанавливаем подачу насоса, соответствующую рабочей точке 1'. Причем напор, создаваемый насосом, необходимо определить в двух рабочих точках: до нагнетательного клапана, что соответствует рабочей точке 1', и за нагнетательным клапаном, что соответствует рабочей точке 2. Описанные действия повторяются для пар рабочих точек 1'' и 3, 1''' и 4 (см. рис. 2). Для построения напорной характеристики насоса необходимо так же снять напор холостого хода, ему соответствует полное закрытие нагнетательного клапана.

По результатам выполненной работы составляется протокол испытаний.

Если во время проведения работы были замерены параметры рабочих точек 2, 3 и 4, то характеристика системы известна и можно по полученным результатам построить график регулирования подачи насоса на миллиметровке. Общий вид графика приведен на рис. 2.

Если параметры рабочих точек 2, 3 и 4 не замерялись из-за отсутствия манометра, то их необходимо найти по приведенному соотношению (\*). Это позволит получить параметры характеристики системы и далее построить график регулирования подачи насоса.

Положение рабочих точек 2, 3 и 4 необходимо проверить расчетным путем. Для лабораторного стенда при отсутствии статической составляющей потерь напора для рабочей точки 1 справедливо соотношение

$$H_1 = R \cdot Q_1^2, \quad (*)$$

где  $H_1$  и  $Q_1$  — напор, м вод. ст., и подача, м<sup>3</sup>/ч, в рабочей точке 1, определенные при испытаниях.

Из приведенного соотношения находим обобщенное сопротивление системы

$$R = \frac{H_1}{Q_1^2}$$

Полагая, что при испытаниях режим движения жидкости по трубопроводам остается турбулентным, используем полученное значение  $R$  для определения напора насоса на заданных режимах подачи, соответствующих рабочим точкам 2, 3 и 4. Для этого достаточно в приведенное ранее соотношение подставить значение частичной подачи насоса, соответствующее рабочим точкам 2, 3 и 4. При известном  $R$ , справедливом для любой рабочей точки, получим по соотношению (\*) значение напора в рабочих точках 2, 3 и 4, необходимое для уточнения характеристики системы.

Описанный метод можно также использовать для определения напора за нагнетательным клапаном насоса, если за ним не установлен манометр.

Полученные рабочие точки  $I'$ ,  $I''$  и  $I'''$  лежат на напорной характеристике насоса. Соответствующие им рабочие точки 2, 3 и 4 лежат на характеристике системы. С величиной напора, определяемой в точках 2, 3 и 4, жидкость поступает в систему. Разность напоров  $\Delta H_2$ ,  $\Delta H_3$  и  $\Delta H_4$  в парных рабочих точках  $I'$  и 2,  $I''$  и 3,  $I'''$  и 4 представляет собой потерю напора на нагнетательном клапане (дроссельном) — см. рис. 2.

По результатам замера параметров, вписанных в таблицу протокола испытаний, строят график, интерпретирующий принцип регулирования подачи и напора центробежного насоса дросселированием.

## Протокол испытаний регулирования подачи центробежного насоса дросселированием

| Величина                                              | Обозначение/<br>формула               | Размерность       | Режимы работы<br>(рабочие точки) |  |  |  |  |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|----------------------------------|--|--|--|--|
|                                                       |                                       |                   | I                                |  |  |  |  |
| Подача                                                | $Q$                                   | м <sup>3</sup> /ч |                                  |  |  |  |  |
| Поправка к показаниям манометра                       | $\Delta p_n$                          | МПа               |                                  |  |  |  |  |
| Поправка к показаниям мановакуумметра                 | $\Delta p_{вс}$                       | МПа               |                                  |  |  |  |  |
| Давление нагнетания перед дроссельным клапаном        | $p_n^{до}$                            | МПа               |                                  |  |  |  |  |
| Давление нагнетания за дроссельным клапаном           | $p_n^{за}$                            | МПа               |                                  |  |  |  |  |
| Давление всасывания                                   | $p_{вс}$                              | МПа               |                                  |  |  |  |  |
| Исправленное значение $p_n^{до}$                      | $p_{nw}^{до} = p_n^{до} + \Delta p_n$ | МПа               |                                  |  |  |  |  |
| Исправленное значение $p_n^{за}$                      | $p_{nw}^{за} = p_n^{за} + \Delta p_n$ | МПа               |                                  |  |  |  |  |
| Исправленное значение $p_{вс}$                        | $p_{всн} = p_{вс} \pm \Delta p_{вс}$  | МПа               |                                  |  |  |  |  |
| Давление, создаваемое насосом до дроссельного клапана | $p^{до} = p_{nw}^{до} \pm p_{всн}$    | МПа               |                                  |  |  |  |  |
| Давление, создаваемое насосом за дроссельным клапаном | $p^{за} = p_{nw}^{за} \pm p_{всн}$    | МПа               |                                  |  |  |  |  |
| Напор насоса до дроссельного клапана                  | $H^{до} = p^{до} / \rho g$            | м вод. ст.        |                                  |  |  |  |  |
| Напор насоса за дроссельным клапаном                  | $H^{за} = p^{за} / \rho g$            | м вод. ст.        |                                  |  |  |  |  |

## Оформление отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- формулировку цели работы;
- схему лабораторной насосной установки, выполненную в соответствии с ГОСТ «Условные обозначения в трубопроводных системах»;
- описание последовательности выполнения работы;
- таблица протокола испытаний;
- сопутствующие расчеты;
- формулировку принципа регулирования подачи;
- график регулирования подачи по результатам протокола испытаний и расчетов, выполненный на миллиметровке;
- выводы о выполненной работе.

Выводы должны содержать тенденции изменения параметров рабочих точек при регулировании, включая потерю напора на регулирующем (дроссельном) клапане, общую оценку эффективности и область практического использования метода регулирования подачи дросселированием.

## Лабораторная работа № 7

### РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОДАЧИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

**Цель работы:** изучить процесс регулирования подачи центробежного насоса изменением частоты вращения.

Лабораторная работа выполняется на центробежном насосе, привод которого оборудован инвертером для возможности изменения скорости вращения электропривода, путем изменения частоты тока.

При выполнении лабораторной работы используются: центробежный насос с паспортными данными: подача  $Q = 25 \text{ м}^3/\text{ч}$ , напор  $H = 20 \text{ м вод. ст.}$ , частота вращения  $n = 2870 \text{ мин}^{-1}$ , мощность привода  $N = 3,1 \text{ кВт}$ , измерительные приборы: манометр, мановакуумметр, расходомер, инвертер, трубопроводы, запорная арматура, емкости.

Принципиальная схема регулирования подачи центробежного насоса изменением частоты вращения приведена на рис. 1.

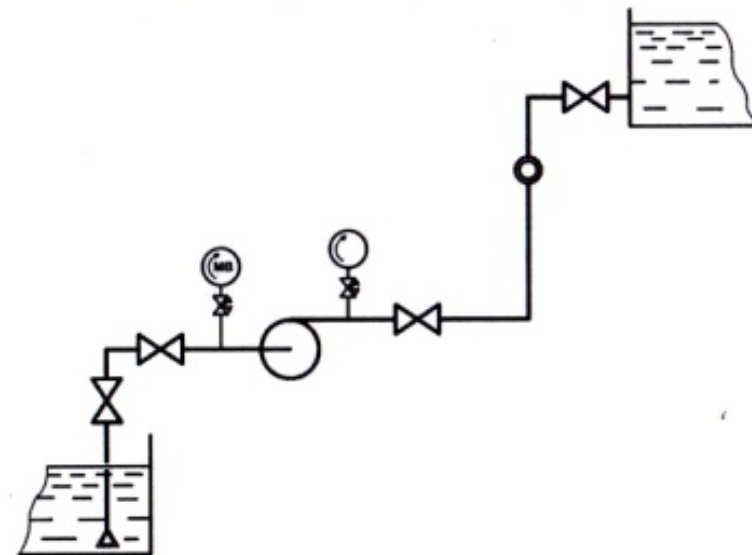


Рис. 1. Принципиальная схема регулирования подачи центробежного насоса изменением частоты вращения

Для реализации способа необходимо иметь привод насоса с регулируемой частотой вращения. При уменьшении частоты вращения насоса от номинальной происходит уменьшение величины подачи и напора насоса.

Интерпретация принципа регулирования изменением частоты вращения в координатах «напор-подача» приведена на рис. 2.

Рабочая точка  $I$  соответствует пересечению характеристик «напор-подача» насоса на номинальной частоте вращения и характеристики системы при полностью открытых клапанах. При уменьшении частоты вращения насоса характеристика «напор-подача» параллельно перемещается вниз, занимая положение, соответствующее рабочей точке  $I'$ . При дальнейшем уменьшении частоты вращения насоса его напорная характеристика параллельно перемещается вниз и последовательно занимает положения, соответствующие рабочим точкам  $I''$  и  $I'''$ . Таким образом, регулирование подачи вариацией частоты вращения

осуществляется за счет изменения положения характеристики «напор-подача» насоса при неизменной характеристике системы.

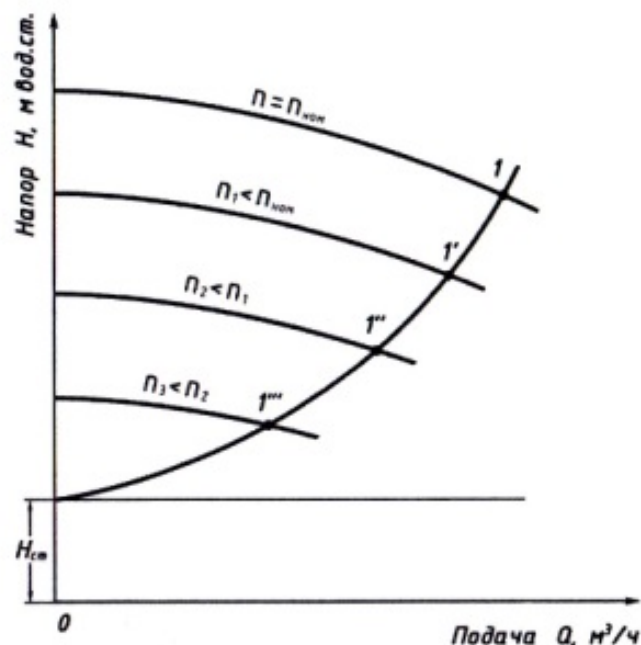


Рис. 2. Интерпретация принципа регулирования подачи центробежного насоса изменением частоты вращения

### Порядок выполнения работы

1. До начала выполнения лабораторной работы необходимо ознакомиться с правилами техники безопасности, правилами технического использования центробежного насоса и схемой насосной установки, на которой будет выполняться лабораторная работа.

2. Назначить руководителя для выполнения лабораторной работы.

3. Распределить обязанности группы (подгруппы) для выполнения лабораторной работы, включающие следующее:

- подготовку и ввод насосной установки в действие, наблюдение за работой;
- снятие показаний манометра, мановакуумметра, расходомера и инвертера;
- проверочный расчет величины напора насоса;

– задание режимов работы насоса;

– ведение протокола испытаний.

4. Подготовить насосную установку к действию:

- убедиться, что емкости стенда подготовлены к работе и заполнены водой;
- произвести внешний осмотр насоса, электродвигателя, арматуры, контрольно-измерительных приборов и убедиться в их исправности;
- проверить плотность фланцевых и штуцерных соединений трубопроводов, сальников насоса и клапанов, контрольно-измерительных приборов;
- открыть клапаны системы, необходимые для выполнения лабораторной работы;
- проверить наличие жидкости в насосе и приемном трубопроводе, при необходимости их заполнить;
- снять поправки к показаниям манометра и мановакуумметра и внести их в таблицу протокола испытаний.

5. Запустить центробежный насос при закрытом нагнетательном клапане и вывести на номинальный режим работы через инвертер. Медленно открыть нагнетательный клапан и вывести насос на номинальный установившийся режим.

6. Снять показания манометра, мановакуумметра и расходомера для определения рабочей точки  $I$  (см. рис. 2).

7. Выполнить проверку правильности снятия показаний контрольно-измерительных приборов, используемых в работе, методику ее проведения. Для этого по формулам, приведенным в протоколе испытаний, рассчитать напор насоса в рабочей точке  $I$ . Значения замеренной по расходомеру подачи и рассчитанного напора насоса в рабочей точке  $I$  должны быть примерно равны паспортным параметрам подачи и напора насоса. Если это равенство соблюдается, можно продолжить работу, если нет, то необходимо найти ошибку и только после этого продолжить лабораторную работу.

8. Далее напор насоса, полученный при определении рабочей точки  $I$ , делим на четыре примерно одинаковые части.

9. Используя обстоятельство, что частота тока, идущего на приводной электродвигатель насоса, прямо пропорциональна частоте его вращения, с помощью инвертера задаем режимы работы насоса при регулировании, чтобы выйти в рабочие точки  $I'$ ,  $I''$  и  $I'''$  (см. рис. 2).

10. Снимаем показания расходомера, манометра и мановакуумметра для определения параметров рабочих точек  $I'$ ,  $I''$  и  $I'''$ , заносим их в таблицу протокола испытаний.

#### Протокол испытаний регулирования подачи центробежного насоса изменением частоты вращения

| Величина                              | Обозначение/<br>формула              | Размерность       | Режимы работы<br>(рабочие точки) |  |  |  |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|----------------------------------|--|--|--|
|                                       |                                      |                   |                                  |  |  |  |
| Частота тока                          | $f$                                  | герц              |                                  |  |  |  |
| Частота вращения насоса               | $n$                                  | мин <sup>-1</sup> |                                  |  |  |  |
| Подача                                | $Q$                                  | м <sup>3</sup> /ч |                                  |  |  |  |
| Поправка к показаниям манометра       | $\Delta p_n$                         | МПа               |                                  |  |  |  |
| Поправка к показаниям мановакуумметра | $\Delta p_{вс}$                      | МПа               |                                  |  |  |  |
| Давление нагнетания                   | $p_n$                                | МПа               |                                  |  |  |  |
| Давление всасывания                   | $p_{вс}$                             | МПа               |                                  |  |  |  |
| Исправленное давление нагнетания      | $p_{инв} = p_n - \Delta p_n$         | МПа               |                                  |  |  |  |
| Исправленное давление всасывания      | $p_{всн} = p_{вс} \pm \Delta p_{вс}$ | МПа               |                                  |  |  |  |
| Давление, создаваемое насосом         | $p = p_{инв} \pm p_{всн}$            | МПа               |                                  |  |  |  |
| Напор насоса                          | $H = p / \rho g$                     | м вод. ст.        |                                  |  |  |  |

Для построения напорной характеристики насоса при 100 % частоте вращения ( $n_{ном}$ ) используем результаты испытаний лабораторной работы по регулированию подачи дросселированием. Эта характеристика проходит через рабочую точку  $I$ . Для построения частичных характеристик, проходящих через рабочие точки  $I'$ ,  $I''$  и  $I'''$ , используем метод их параллельного перемещения.

При уменьшении частоты напорная характеристика насоса перемещается вниз, оставаясь параллельной исходному положению, до совмещения с новой рабочей точкой. Такое перемещение характеристики называется эквидистантным. Таким образом, каждая из рабочих точек  $I'$ ,  $I''$  и  $I'''$  частичных характеристик «напор-подача» насоса может быть достроена.

Отличительной особенностью рассматриваемого метода регулирования подачи является то, что КПД насоса выше, чем при регулировании дросселированием, так как не происходит потери напора насоса.

#### Оформление отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- формулировку цели работы;
- схему лабораторной насосной установки, выполненную в соответствии с ГОСТ «Условные обозначения в трубопроводных системах»;
- описание последовательности выполнения работы;
- протокол испытаний;
- сопутствующие расчеты;
- формулировку принципа регулирования подачи;
- график регулирования подачи по результатам протокола испытаний и расчетов, выполненный на миллиметровке;
- выводы по результатам выполненной работы.

В выводах необходимо отметить характер изменения подачи и напора при регулировании, эффективность и область практического использования метода регулирования подачи изменением частоты вращения.

# РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОДАЧИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА ПЕРЕПУСКОМ

**Цель работы:** изучить процесс регулирования подачи центробежного насоса перепуском.

Лабораторная работа выполняется на центробежном насосе, оборудованном перепускным трубопроводом.

При выполнении лабораторной работы используются: центробежный насос с паспортными данными: подача  $Q = 25 \text{ м}^3/\text{ч}$ , напор  $H = 20 \text{ м вод. ст.}$ , частота вращения  $n = 2870 \text{ мин}^{-1}$ , мощность привода  $N = 3,1 \text{ кВт}$ , измерительные приборы: манометр, мановакуумметр, расходомер, трубопроводы, запорная арматура, емкости.

При выполнении работы используем готовую характеристику «напор-подача» центробежного насоса, полученную при выполнении лабораторной работы «Регулирование подачи центробежного насоса дросселированием».

Принципиальная схема регулирования подачи центробежного насоса перепуском приведена на рис. 1.

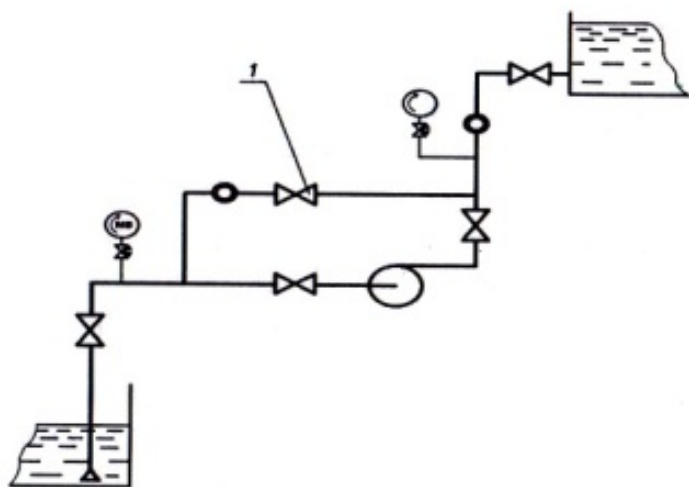


Рис. 1. Принципиальная схема регулирования подачи центробежного насоса перепуском:  
1 – перепускной клапан

Регулирование подачи центробежного насоса перепуском осуществляется путем полного или частичного открытия перепускного клапана, что ведет к снижению подачи и напора.

Процесс регулирования подачи центробежного насоса перепуском в координатах «напор-подача» приведен на рис. 2.

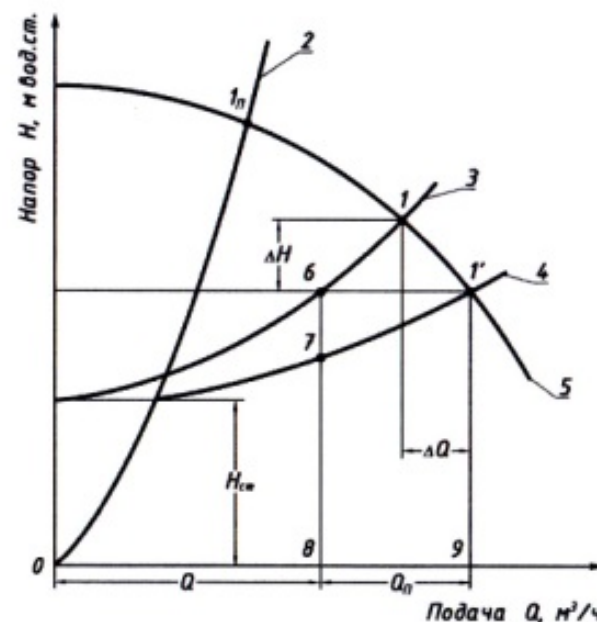


Рис. 2. Принципиальная схема регулирования подачи центробежного насоса перепуском

Характеристики: 2 – перепускного трубопровода, 3 – исходной системы, 4 – исходной системы с перепуском, 5 – напорная характеристика насоса

Рабочие точки:

1 – исходной системы, 1' – исходной системы с перепуском, 1н – перепускного трубопровода, 7 – обеспечивающая подачу жидкости по назначению

Пусть имеем характеристики: перепускного трубопровода 2, исходной системы 3, центробежного насоса 5. При полном открытии перепускного клапана характеристика исходной системы перемещается в положение 4. В результате рабочая точка 1 исходной системы перемещается в положение 1'. При этом происходит падение напора на величину  $\Delta H$  и увеличение подачи на величину  $\Delta Q$ . Рабочая точка 1'

определяет величину полной подачи насоса при регулировании перепуском. Для определения величины перепуска и подачи в систему проводим вспомогательную линию через рабочую точку  $I'$  параллельно оси подач до оси напора. Точка  $b$  пересечения вспомогательной линии с исходной характеристикой системы  $3$  делит суммарную подачу на величину перепуска  $Q_n$  и подачу в систему (по назначению)  $Q_c$ . Перпендикуляр, опущенный из точки  $b$  на ось подач, пересекает характеристику исходной системы с перепуском в точке  $7$ , которая определяет величину напора жидкости, идущей по назначению в систему.

Площадь  $I'789I'$  (см. рис.2) показывает затраты энергии теряемые на реализацию процесса регулирования перепуском (на рециркуляцию).

При частичном открытии перепускного клапана новая рабочая точка системы будет находиться на характеристике насоса  $H-Q$  между точками  $I$  и  $I'$ . Все приведенные объяснения для рабочей точки  $I'$ , будут справедливы и для любой новой промежуточной рабочей точки при частичном открытии перепускного клапана.

#### Порядок выполнения работы

1. Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо ознакомиться:

- с правилами техники безопасности;
- с правилами технического использования центробежного насоса;
- со схемой насосной установки.

2. Назначить руководителя для выполнения лабораторной работы.

3. Распределить обязанности группы (подгруппы) для выполнения лабораторной работы, включающие следующее:

– подготовка и ввод насосной установки в действие, наблюдение за работой;

- снятие показаний манометра, мановакуумметра и расходомера;
- проверочный расчет величины напора насоса;
- задание режимов работы насоса;
- ведение протокола испытаний.

4. Подготовить насосную установку к действию:

– убедиться, что емкости стенда подготовлены к работе и заполнены водой;

– произвести внешний осмотр насоса, электродвигателя, арматуры, контрольно-измерительных приборов и убедиться в их исправности;

– проверить плотность фланцевых и штуцерных соединений трубопроводов, сальников насоса и клапанов, контрольно-измерительных приборов;

– открыть на системе клапаны необходимые для выполнения лабораторной работы;

– проверить наличие жидкости в насосе и приемном трубопроводе (при необходимости заполнить трубопровод и насос);

– снять поправки к показаниям манометра и мановакуумметра и внести их в протокол испытаний.

5. После запуска насоса медленно открыть полностью нагнетательный клапан. После выхода насоса на установившийся режим снять показания контрольно-измерительных приборов. Их обработка дает параметры рабочей точки  $I$  (см. рис. 2).

6. Выполнить проверку правильности снятия показаний контрольно-измерительных приборов, используемых в работе, и методику ее проведения. Для этого по формулам, приведенным в таблице протокола испытаний, рассчитать напор насоса в рабочей точке  $I$ . Значения замеренной по расходомеру подачи и рассчитанного напора насоса в рабочей точке  $I$  должны быть примерно равны паспортным параметрам подачи и напора насоса. Если это равенство соблюдается, можно продолжить работу. В случае несоответствия замеренных параметров паспортным данным насоса необходимо найти ошибку и только после этого продолжить выполнение лабораторной работы.

7. Плавное полностью открыть перепускной клапан, выйти на установившийся режим. Снять показания контрольно-измерительных приборов, обработка которых дает параметры рабочей точки  $I'$  (см. рис. 2).

8. Плавное прикрыть перепускной клапан наполовину. Снять показания контрольно-измерительных приборов, обработка которых дает рабочую точку, находящуюся между точками  $I$  и  $I'$  (см. рис. 2), как промежуточный режим при регулировании перепуском.

9. Полученные результаты внести в таблицу протокола испытаний.

**Протокол испытаний  
регулирования центробежного насоса перепуском**

| Величина                              | Обозначение/<br>формула              | Размерность       | Режимы работы –<br>перепуск |               |                     |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------|---------------------|
|                                       |                                      |                   | закрыт                      | открыт на 1/2 | открыт<br>полностью |
| Подача в систему                      | $Q$                                  | м <sup>3</sup> /ч |                             |               |                     |
| Величина перепуска                    | $Q_{пер}$                            | м <sup>3</sup> /ч |                             |               |                     |
| Поправка к показаниям манометра       | $\Delta p_n$                         | МПа               |                             |               |                     |
| Поправка к показаниям мановакуумметра | $\Delta p_{вс}$                      | МПа               |                             |               |                     |
| Давление нагнетания                   | $p_n$                                | МПа               |                             |               |                     |
| Давление всасывания                   | $p_{вс}$                             | МПа               |                             |               |                     |
| Исправленное давление нагнетания      | $p_{ин} = p_n - \Delta p_n$          | МПа               |                             |               |                     |
| Исправленное давление всасывания      | $p_{всн} = p_{вс} \pm \Delta p_{вс}$ | МПа               |                             |               |                     |
| Давление, создаваемое насосом         | $p = p_{ин} \pm p_{всн}$             | МПа               |                             |               |                     |
| Напор насоса                          | $H = p / \rho g$                     | м вод. ст.        |                             |               |                     |

10. Обработать результаты испытаний согласно рис. 3. Построить характеристики систем: исходной, исходной с полностью и половинным открытием перепускного клапана.

11. Нанести на полученный график величины перепуска и подачи в систему (по назначению) на режимах полного и половинного открытия перепускного клапана.

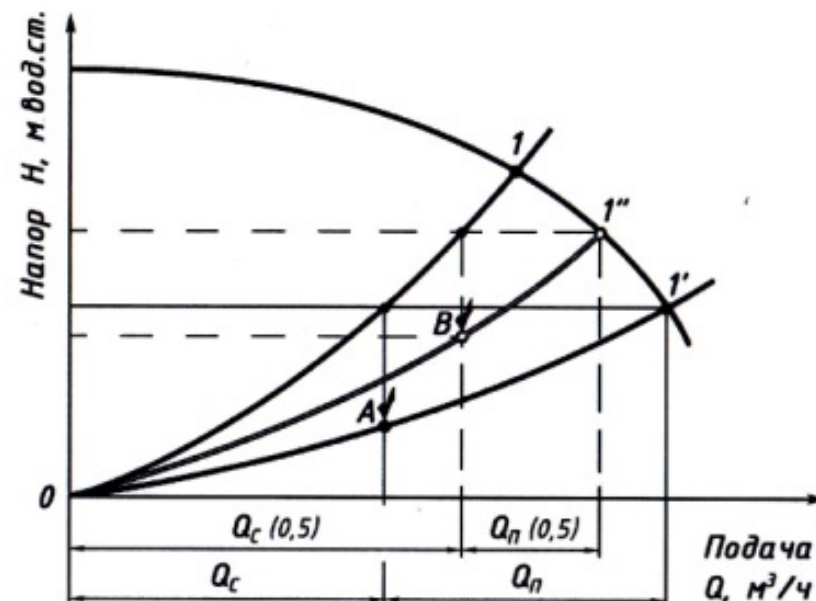


Рис. 3. Результаты испытаний по регулированию подачи центробежного насоса перепуском

Характеристики: 0–1 — исходная; 0–1' — исходная с полным перепуском; 0–1'' — исходная с половинным перепуском;  $Q_c$  и  $Q_n$  — количество жидкости поступающей по назначению и на перепуск; A и B — действительные рабочие точки системы

12. Положения рабочих точек A и B при полном и половинном открытии перепускного клапана (см. рис. 3) необходимо проверить расчетным путем. Для лабораторного стенда при отсутствии статической составляющей потерь напора для рабочей точки 1' справедливо соотношение

$$H_{I'} = R \cdot Q_{I'}^2, \quad (*)$$

где  $H_{I'}$  и  $Q_{I'}$  — напор, м вод. ст., и подача, м<sup>3</sup>/ч, в рабочей точке  $I'$ , определенные при испытаниях,

$$Q_{I'} = Q_c + Q_n,$$

где  $Q_c$  и  $Q_n$  — подача жидкости в систему и величина перепуска соответственно.

13. Из приведенного соотношения находим обобщенное сопротивление исходной системы с полностью открытым перепускным клапаном:

$$R = \frac{H_{I'}}{Q_{I'}^2}$$

14. Полагая, что при испытаниях режим движения жидкости по трубопроводам остается турбулентным, используем полученное значение  $R$  для определения напора насоса в рабочей точке  $A$ . Для этого выполним подстановку в соотношение (\*) величины  $Q_c$ , соответствующей полному открытию перепускного клапана.

15. Напор насоса в рабочей точке  $B$  находим по аналогии приведенной выше для рабочей точки  $A$ , при этом используем в качестве исходных данных параметры рабочей точки  $I''$ .

16. Рабочая точка  $A$  принадлежит системе  $0-I'$  с полностью открытым перепускным клапаном, а рабочая точка  $B$  — системе  $0-I''$  с половинным открытием перепускного клапана. После определения параметров рабочих точек  $A$  и  $B$  для системы  $0-I'$  имеем параметры начала отсчета и двух рабочих точек  $A$  и  $I'$ , а для системы  $0-I''$  — параметры начала отсчета и двух рабочих точек  $A$  и  $I''$ . По трем упомянутым точкам с достаточной для выполнения лабораторной работы точностью можем построить характеристики систем  $0-I'$  и  $0-I''$ .

17. Для повышения точности построения характеристики системы можно задать дополнительные промежуточные значения подач для систем  $0-I'$  и  $0-I''$  и найти соответствующие им напоры по соотношению (\*).

## Оформление отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- формулировку цели работы;
- схему лабораторной насосной установки, выполненную в соответствии с ГОСТ «Условные обозначения в трубопроводных системах»;
- описание последовательности выполнения работы;
- протокол испытаний;
- сопутствующие расчеты;
- формулировку принципа регулирования подачи;
- график регулирования подачи по результатам таблицы протокола испытаний и расчетов, выполненный на миллиметровой бумаге;
- выводы по результатам выполненной работы.

Выводы должны содержать оценку качества процесса регулирования по результатам испытаний, его сравнительную эффективность и перечисление наименований лопастных насосов, которые могут регулироваться перепуском.

### Лабораторная работа № 9

#### РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОДАЧИ ВИНТОВОГО НАСОСА ПЕРЕПУСКОМ

**Цель работы:** изучить процесс регулирования подачи винтового насоса перепуском.

Лабораторная работа выполняется на винтовом насосе, оборудованном перепускным трубопроводом.

При выполнении лабораторной работы используются: винтовой насос с паспортными данными: подача  $Q = 3$  м<sup>3</sup>/ч, напор  $H = 5$  м вод. ст., частота вращения  $n = 940$  мин<sup>-1</sup>, мощность привода  $N = 2,1$  кВт, измерительные приборы: манометр, мановакуумметр, расходомеры, трубопроводы, запорная арматура, емкости.

При выполнении работы используем готовую характеристику «напор-подача» винтового насоса, полученную при выполнении лабораторной работы «Снятие характеристики «напор-подача» винтового

насоса». Основные параметры характеристики: напор  $H = 0$  м вод. ст., подача  $Q = 3$  м³/ч,  $H = 5$  м вод. ст., подача  $Q = 2,8$  м³/ч.

Принципиальная схема регулирования подачи винтового насоса перепуском приведена на рис. 1.

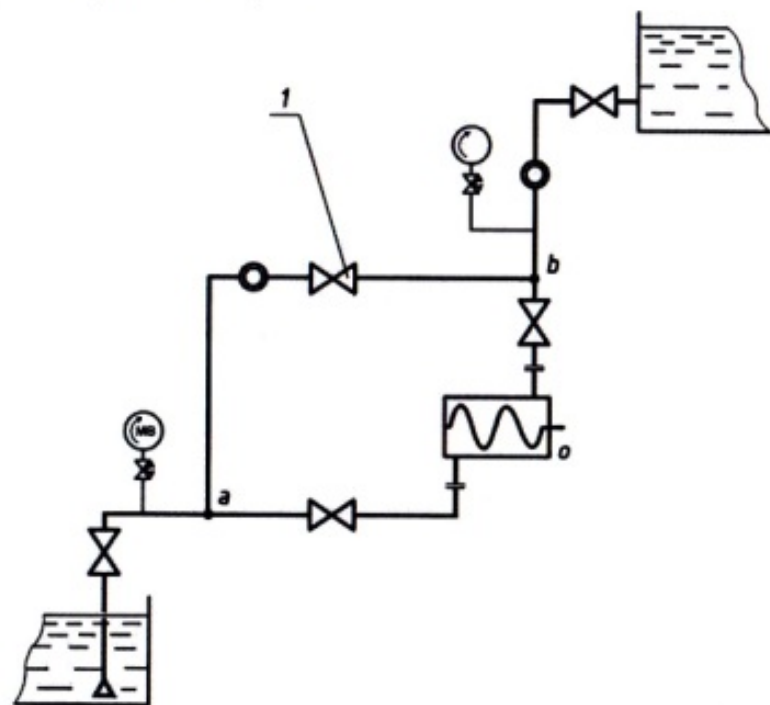


Рис. 1. Принципиальная схема регулирования подачи винтового насоса перепуском:  
1 – перепускной клапан

Регулирование подачи винтового насоса перепуском осуществляется путем полного или частичного открытия перепускного клапана, что ведет к увеличению подачи и снижению напора.

Интерпретация принципа регулирования винтового насоса перепуском в координатах «напор-подача» показана на рис. 2.

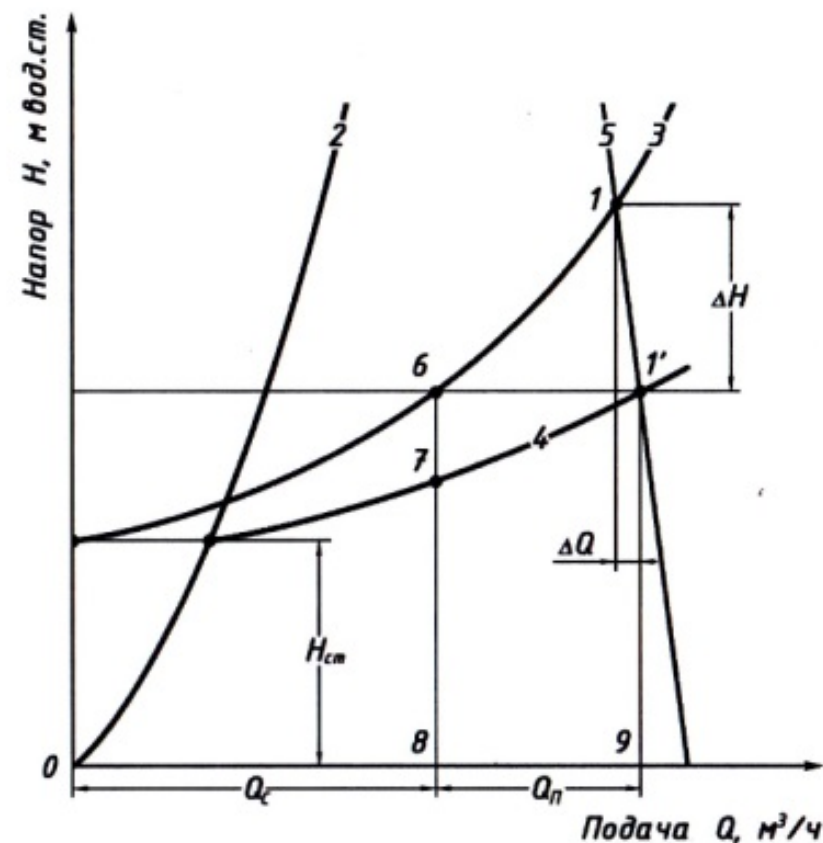


Рис. 2. Принципиальная схема регулирования подачи винтового насоса перепуском

Характеристики: 2 – перепускного трубопровода, 3 – исходной системы, 4 – исходной системы с перепуском, 5 – характеристика насоса;

$\Delta Q$  – увеличение подачи;  $\Delta H$  – снижение напора.

Рабочие точки: 1 – исходной системы, 1' – исходной системы с перепуском;

Площадь 1'-7-8-9-1' – потеря энергии на регулирование перепуском

Пусть имеем характеристики: перепускного трубопровода 2, исходной системы 3, винтового насоса 5. При полном открытии перепускного клапана характеристика исходной системы перемещается в положение 4. В результате рабочая точка 1 исходной системы переместится в положение 1'. При этом происходит падение напора на величину  $\Delta H$  и увеличение подачи на величину  $\Delta Q$ .

Рабочая точка 1' определяет величину полной подачи насоса при регулировании перепуском. Для определения величины перепуска и подачи в систему проводим вспомогательную линию через рабочую точку 1' параллельно оси подач до оси напора. Точка 6 пересечения вспомогательной линии с исходной характеристикой системы 3 делит суммарную подачу на величину перепуска  $Q_n$  и подачу в систему  $Q_c$ . Перпендикуляр, опущенный из точки 6 на ось подач, пересекает характеристику исходной системы с перепуском в точке 7, которая определяет величину напора жидкости, идущей по назначению в систему.

Площадь 1'-7-8-9-1' (см. рис. 2) показывает затраты энергии потребляемые на реализацию процесса регулирования перепуском (рециркуляцию).

При частичном открытии перепускного клапана новая рабочая точка системы будет находиться на характеристике насоса  $H-Q$  между точками 1 и 1'. Все приведенные объяснения для рабочей точки 1' будут справедливы и для любой новой промежуточной рабочей точки при частичном открытии перепускного клапана.

### Порядок выполнения работы

1. Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо ознакомиться:

- с правилами техники безопасности;
- с правилами технического использования винтового насоса;
- со схемой насосной установки.

2. Назначить руководителя и распределить обязанности группы (подгруппы) для выполнения лабораторной работы, включающие следующие процедуры:

- подготовка и ввод насосной установки в действие, наблюдение за работой;

- снятие показаний манометра, мановакуумметра и расходомера;
- проверочный расчет величины напора насоса;
- задание режимов работы насоса;
- ведение протокола испытаний.

3. Подготовить насосную установку к действию:

- убедиться, что емкости стенда подготовлены к работе и заполнены водой;
- произвести внешний осмотр насоса, электродвигателя, арматуры, контрольно-измерительных приборов и убедиться в их исправности;
- проверить плотность фланцевых и штуцерных соединений трубопроводов, сальников насоса и клапанов, контрольно-измерительных приборов;
- открыть клапаны системы, необходимые для выполнения лабораторной работы;
- проверить наличие жидкости в насосе и приемном трубопроводе, при необходимости их заполнить;
- снять поправки к показаниям манометра и мановакуумметра и внести их в протокол испытаний.

4. Запустить винтовой насос при открытых нагнетательных клапанах. На этом режиме гидравлическое сопротивление системы лабораторного стенда мало (составляет около 1,5 м вод. ст.) что затрудняет снятие параметров насоса при регулировании. Поэтому путем прикрытия нагнетательного клапана выводим насос на режим, соответствующий напору 5 м вод. ст. (паспортное значение). После выхода насоса на установившийся режим необходимо снять показания контрольно-измерительных приборов, в результате получим параметры рабочей точки 1 (см. рис.2).

5. Выполнить проверку правильности снятия показаний контрольно-измерительных приборов, используемых в работе и методику ее проведения. Для этого по формулам, приведенным в протоколе испытаний, рассчитать напор насоса в рабочей точке 1. Значения замеренной по расходомеру подачи и рассчитанного напора насоса в рабочей точке 1 должны быть примерно равны паспортным параметрам подачи и напора насоса. Если это равенство соблюдается, то можно продол-

жить работу. При несоответствии замеренных параметров паспортным данным насоса необходимо найти ошибку и только после этого продолжить выполнение лабораторной работы.

6. Полностью плавно открыть перепускной клапан, снять показания контрольно-измерительных приборов. Получим рабочую точку  $1'$  (см. рис. 2).

7. Плавнo прикрыть перепускной клапан наполовину, снять показания контрольно-измерительных приборов, получим рабочую точку, находящуюся между точками  $1$  и  $1'$  (см. рис. 2), как промежуточный режим при регулировании перепуском.

8. Полученные результаты внести в таблицу протокола испытаний.

**Протокол испытаний**  
**регулирования подачи винтового насоса перепуском**

| Величина                              | Обозначение/<br>формула              | Размерность       | Режимы работы-<br>перепуск |               |                     |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|----------------------------|---------------|---------------------|
|                                       |                                      |                   | закрыт                     | открыт на 1/2 | открыт<br>полностью |
| Подача в систему                      | $Q_c$                                | м <sup>3</sup> /ч |                            |               |                     |
| Величина перепуска                    | $Q_{пер}$                            | м <sup>3</sup> /ч |                            |               |                     |
| Поправка к показаниям манометра       | $\Delta p_n$                         | МПа               |                            |               |                     |
| Поправка к показаниям мановакуумметра | $\Delta p_{вс}$                      | МПа               |                            |               |                     |
| Давление нагнетания                   | $p_n$                                | МПа               |                            |               |                     |
| Давление всасывания                   | $p_{вс}$                             | МПа               |                            |               |                     |
| Исправленное давление нагнетания      | $p_{нип} = p_n + \Delta p_n$         | МПа               |                            |               |                     |
| Исправленное давление всасывания      | $p_{всн} = p_{вс} \pm \Delta p_{вс}$ | МПа               |                            |               |                     |
| Давление, создаваемое насосом         | $p = p_{нип} \pm p_{всн}$            | МПа               |                            |               |                     |
| Напор насоса                          | $H = p / \rho g$                     | м вод. ст.        |                            |               |                     |

9. Обработать графически результаты испытаний согласно рис. 3:

– построить характеристики систем: исходной, исходной с полностью открытым перепускным клапаном и исходной с половинным открытием перепускного клапана.

– нанести на полученный график величины, замеренные при испытаниях перепуска и подачи в систему (по назначению) в режимах полного и половинного открытия перепускного клапана.

– нанести на график рабочие точки.

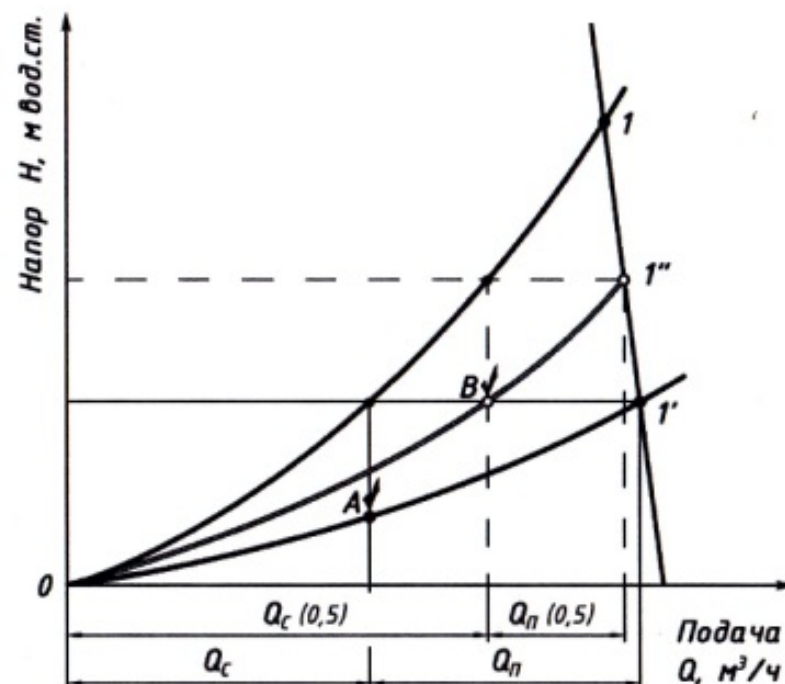


Рис. 3. Результаты испытаний винтового насоса при регулировании подачи перепуском

Характеристики: 0–1 — исходная; 0–1' — исходная с полным перепуском; 0–1'' — исходная с половинным перепуском;  $Q_c$  и  $Q_n$  — подача в систему и перепуск соответственно; А и В — действительные рабочие точки системы

10. Положения рабочих точек при полном и половинном открытии перепускного клапана (точки А и В см. рис. 3.) необходимо проверить

расчетным путем. Для лабораторного стенда при отсутствии статической составляющей потерь напора для рабочей точки  $I'$  справедливо соотношение

$$H_{I'} = R \cdot Q_{I'}^2, \quad (*)$$

где  $H_{I'}$  и  $Q_{I'}$  — напор, м вод. ст., и подача, м<sup>3</sup>/ч, в рабочей точке  $I'$ , определенные при испытаниях.

$$Q_{I'} = Q_c + Q_n$$

где  $Q_c$  и  $Q_n$  — подача жидкости в систему и величина перепуска соответственно.

11. Из приведенного соотношения находим обобщенное сопротивление исходной системы с полностью открытым перепускным клапаном

$$R = \frac{H_{I'}}{Q_{I'}^2}$$

12. Полагая, что при испытаниях режим движения жидкости по трубопроводам остается турбулентным, используем полученное значение  $R$  для определения напора насоса в рабочей точке  $A$ . Для этого выполним подстановку в соотношение  $(*)$  величины  $Q_c$ , соответствующей полному открытию перепускного клапана.

13. Напор насоса в рабочей точке  $B$  находим по приведенной ранее аналогии выше для рабочей точки  $A$ , при этом используем в качестве исходных данных параметры рабочей точки  $I''$ .

14. Рабочая точка  $A$  принадлежит системе  $0-I'$  с полностью открытым перепускным клапаном, а рабочая точка  $B$  — системе  $0-I''$  с половинным открытием перепускного клапана. После определения параметров рабочих точек  $A$  и  $B$  для системы  $0-I'$  имеем параметры начала отсчета и двух рабочих точек  $A$  и  $I'$ , а для системы  $0-I''$  — начала отсчета и двух рабочих точек  $A$  и  $I''$ . По трем указанным точкам с достаточной для выполнения лабораторной работы точностью можем построить характеристики систем  $0-I'$  и  $0-I''$ .

15. Для повышения точности построения характеристики системы можно задать дополнительные промежуточные значения подач для

систем  $0-I'$  и  $0-I''$  и найти соответствующие им напоры по соотношению  $(*)$ .

### Оформление отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- формулировку цели работы;
- схему лабораторной насосной установки, выполненную в соответствии с ГОСТ «Условные обозначения в трубопроводных системах»;
- описание последовательности выполнения работы;
- протокол испытаний;
- сопутствующие расчеты;
- формулировку принципа регулирования подачи;
- график регулирования подачи винтового насоса по результатам протокола испытаний и расчетов, выполненный на миллиметровой бумаге;
- выводы по результатам выполненной работы.

Выводы должны содержать оценку качества процесса регулирования по результатам испытаний, его сравнительную эффективность с указанием типов объемных насосов, которые можно регулировать перепуском.

### Лабораторная работа №10

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КПД ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

**Цель работы :** закрепление знаний по определению КПД центробежного насоса.

При выполнении лабораторной работы используется центробежный насос с паспортными данными:  $Q = 25$  м<sup>3</sup>/ч, напор  $H = 20$  м вод.ст., частота вращения  $n = 2870$  мин<sup>-1</sup>, мощность привода  $N = 3,1$  кВт, измерительные приборы: манометр, мановакуумметр, расходомер, ваттметр.

Принципиальная схема лабораторного стенда приведена на рис. 1.

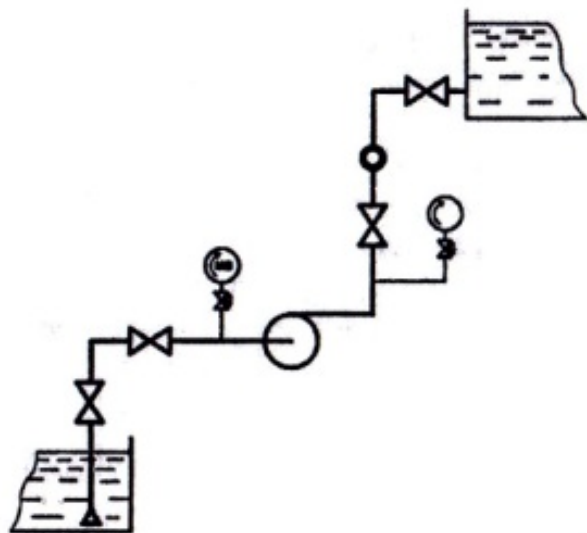


Рис. 1. Принципиальная схема

КПД насоса находим из формулы мощности потребляемой насосом

$$N_n = \frac{Q \rho g H}{1000 \eta_n}, \text{ кВт, откуда}$$

$$\eta_n = \frac{Q \rho g H}{1000 N_n},$$

где  $Q$  — подача насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$

$H$  — напор, м вод. ст

$\rho$  — плотность перекачиваемой жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$

$g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$

$N_n$  — мощность, потребляемая насосом, кВт

Для получения КПД центробежного насоса назначаем режимы работы насоса равным 5, 10, 15, 20 и 25  $\text{м}^3/\text{ч}$ , на которых определяем напоры насоса по показаниям манометра и мановакуумметра, потребляемую насосом мощность по ваттметру. Результаты замеров заносим в протокол испытаний. По результатам замеров производим расчет КПД центробежного насоса на заданных режимах по приведенной выше формуле. Далее строим график КПД центробежного насоса в координатах КПД — подача. Ориентировочный график приведен на рис 2.

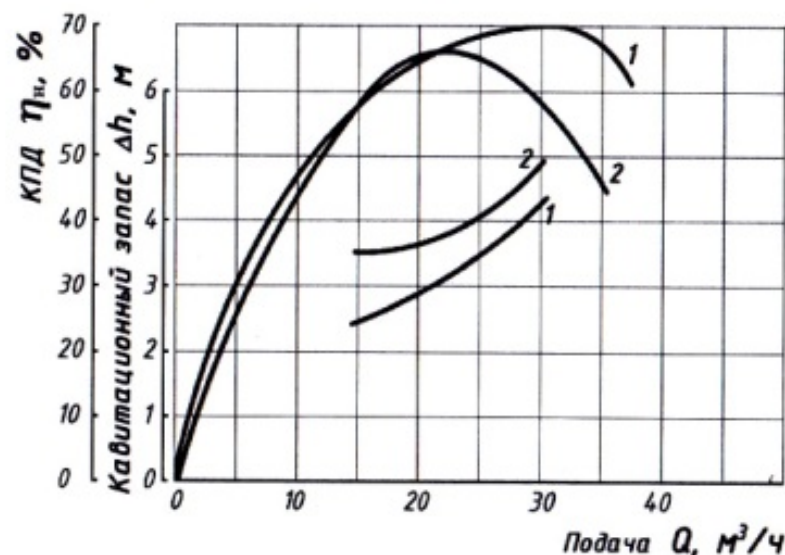


Рис. 2. Ориентировочный график КПД центробежного насоса

### Порядок выполнения работы

Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо ознакомиться:

- с правилами техники безопасности;
- с правилами технического использования центробежного насоса;
- со схемой насосной установки.

Назначить руководителя для выполнения лабораторной работы.

Распределить обязанности группы (подгруппы) для выполнения лабораторной работы, включающее следующие:

- подготовка и ввод насосной установки в действие, наблюдение за работой;
- снятие показаний манометра, мановакуумметра и расходомера;
- проверочный расчет величины напора насоса;
- задание режимов работы насоса;
- ведение протокола испытаний.

Подготовить насосную установку к действию:

- произвести внешний осмотр насоса, электродвигателя, арматуры, контрольно-измерительных приборов и убедиться в их исправности;

- проверить плотность фланцевых и штуцерных соединений трубопроводов, сальников насоса и клапанов, контрольно-измерительных приборов;

- открыть на системе клапаны необходимые для выполнения лабораторной работы;

- проверить наличие жидкости в насосе и в приемном трубопроводе (при необходимости заполнить трубопровод и насос);

- снять поправки к показаниям манометра и мановакуумметра и внести их в протокол испытаний.

После запуска насоса медленно полностью открыть нагнетательный клапан. После выхода насоса на устоявшийся режим снять показания контрольно-измерительных приборов. Их обработка дает параметры рабочей точки 1 (см. рис. 2)

Выполнить проверку правильности снятия показаний контрольно-измерительных приборов, используемых в работе, и методику ее проведения. Для этого по формулам, приведенным в таблице протокола испытаний, рассчитать напор насоса в рабочей точке 1. Значения замеренной по расходомеру подачи и рассчитанного напора насоса в рабочей точке 1 должны быть примерно равны паспортным параметрам напора и подачи насоса. Если это равенство соблюдается, можно продолжить работу. В случае несоответствия замеренных параметров паспортным данным насоса необходимо найти ошибку и только после этого продолжить выполнение лабораторной работы.

Плавное полностью открыть перепускной клапан, выйти на установившийся режим. Снять показания контрольно-измерительных приборов, обработка которых дает параметры рабочей точки 1' (см. рис.2).

Плавное прикрыть перепускной клапан наполовину. Снять показания контрольно-измерительных приборов, обработка которых дает рабочую точку, находящуюся между точками 1 и 1', как промежуточный режим при регулировании перепуском.

Полученные результаты внести в таблицу протокола испытаний.

## Оформление отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- формулировку цели работы;
- схему лабораторной насосной установки, выполненную в соответствии с ГОСТ условных обозначений в трубопроводной системе;
- описание последовательности выполнения работы;
- протокол испытаний;
- сопутствующие расчеты;
- готовую характеристику «напор-подача» центробежного насоса, выполненную на миллиметровке;
- выводы о выполненной работе.

Проанализировать вид характеристики «напор-подача» центробежного насоса, указать типы насосов, работающих по данной характеристике, и перечислить их.

## Протокол испытания

| Величина                                     | Оформление/<br>формула                   | Размерность       | Режимы работы |   |   |   |   |   |
|----------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------|---------------|---|---|---|---|---|
|                                              |                                          |                   | 1             | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1. Подача в систему                          | $Q$                                      | м <sup>3</sup> /ч |               |   |   |   |   |   |
| 2. Давление нагнетания                       | $p_n$                                    | МПа               |               |   |   |   |   |   |
| 3. Поправка к давлению нагнетания            | $\Delta p_n$                             | МПа               |               |   |   |   |   |   |
| 4. Исправленное значение давления нагнетания | $p_{n.и} = p_n - \Delta p_n$             | МПа               |               |   |   |   |   |   |
| 5. Давление всасывания                       | $p_{вс}$                                 | МПа               |               |   |   |   |   |   |
| 6. Поправка к давлению всасывания            | $\Delta p_{вс}$                          | МПа               |               |   |   |   |   |   |
| 7. Исправленное значение давления всасывания | $p_{вс.и} = p_{н.и} \pm \Delta p_{вс.и}$ | Мпа               |               |   |   |   |   |   |
| 8. Давление, создаваемое насосом             | $p = p_{н.и} \pm p_{вс.и}$               | МПа               |               |   |   |   |   |   |
| 9. Напор насоса                              | $H = \frac{p}{\rho g}$                   | м.вод.ст.         |               |   |   |   |   |   |
| 10. Потребляемая насосом мощность            | $N_n$                                    | кВт               |               |   |   |   |   |   |
| 11. КПД насоса                               | $\eta_n = \frac{Q \rho g H}{1000 N_n}$   |                   |               |   |   |   |   |   |

# **ПРАВИЛА РАБОТЫ И ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ В ЛАБОРАТОРИЯХ КАФЕДРЫ**

1. Перед началом выполнения лабораторных и практических работ необходимо прослушать инструктаж об основных правилах работы и техники безопасности, уполномоченных для этого работников лаборатории и подтвердить это подписью в специальном журнале.

2. На проведение работы необходимо получить разрешение начальника лаборатории или лица его замещающего.

3. При выполнении работ по сборке и разборке узлов механизмов необходимо применять предназначенный для этого специальный инструмент приспособления и устройства. Употребление несоответствующего и неисправного инструмента запрещается.

4. Правом самостоятельного пользования подъемными устройствами (тали, домкраты, тельферы) и электроизмерительными приборами и установками пользуются работники лаборатории.

5. При производстве такелажных работ руки должны быть защищены рукавицами.

6. Запрещается подключать электропитание к различным приборам и приспособлениям без разрешений начальника лаборатории или лица его замещающего.

7. При работе с приборами диагностики (толщиномерами, виброметрами и т.п.), и приборами теплотехники и гидравлики необходимо помнить, что это точные и дорогие устройства, которые требуют к себе бережного отношения.

8. В лаборатории курение ЗАПРЕЩЕНО.

# **ПОНЯТИЕ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ**

Эксплуатация морских судов и судовых энергетических установок связана с необходимостью перемещения жидкости по трубопроводам между емкостями, расположенными на судне, при передаче на другое судно или на берег, а также для подачи топлива, воды, масла к судовым механизмам. Для указанных целей суда оборудуются насосными установками.

В состав судовой насосной установки входит комплекс оборудования: насосы, трубопроводы, арматура, контрольно-измерительные приборы, средства дистанционного и автоматического управления.

Насос — гидравлическая машина, с помощью которой жидкости сообщается энергия необходимая для ее перемещения по трубопроводной сети. Работа насоса характеризуется параметрами подача и напор.

Подача — это количество жидкости, подаваемое насосом в единицу времени. Условное обозначение подачи  $Q$ , размерность  $м^3/ч$ .

Напор — это количество энергии, сообщаемое насосом единице массы жидкости. Условное обозначение напора  $H$ , размерность  $м вод. ст.$

На рисунке 1 приведена принципиальная схема работы насосной установки танкера. В ее состав входят все типовые элементы судовой насосной установки.

Для оценки режимов работы насосной установки используются характеристики ««напор-подача»» насоса и системы. Обе характеристики представляют собой зависимость изменения напора от подачи. Характеристику ««напор-подача»» насоса ( $Q-H$ ) получают путем проведения стендовых заводских испытаний насоса на воде.

Характеристика системы представляет собой сумму статической  $H_{ст}$  и динамической  $H_{дин}$  составляющих потерь напора.

$$H_c = H_{ст} + H_{дин}$$

Динамическая составляющая потерь напора это гидравлическое сопротивление системы. Статическая составляющая потерь напора это разность уровней в осушаемой и наполняемой емкостях с учетом в них давления над свободной поверхностью жидкости.

Для насосной установки, приведенной на рис. 10. 1, статическая составляющая потеря напора равна

$$H_{ст} = T + H_o + H_6 - (H_i + H_{ос}) + \frac{P_6 - P_i}{\rho g},$$

где  $H_i$ ,  $H_6$  — текущие значения уровней жидкости в судовой и береговой емкостях;  $P_i$ ,  $P_6$  — давление над свободными поверхностями жидкостями в судовой и береговой емкостях;  $H_{ос}$  — высота двойного дна;  $H_o$  — геометрическая отметка береговой емкости по отношению к уровню моря;  $T$  — текущее значение осадки судна.

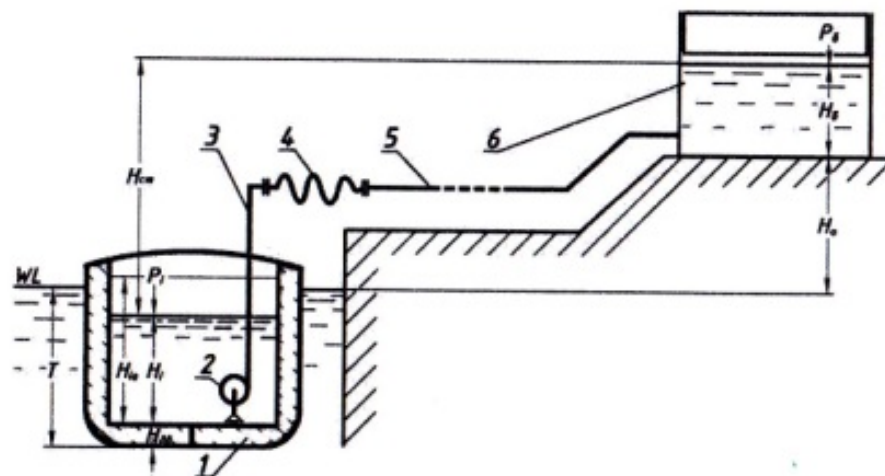


Рис. 1. Принципиальная схема работы насосной установки танкера:

1 — танкер; 2 — грузовой насос; 3 — судовой нагнетательный трубопровод; 4 — шланг; 5 — береговой трубопровод; 6 — береговая емкость

Характеристики «напор-подача» насоса ( $Q-H$ ) и системы ( $H_c$ ) приведены на рис. 2.

Точка пересечения характеристик насоса и трубопроводной сети называется рабочей точкой системы. В ней напор ( $H_n$ ) и подача ( $Q_n$ ), развиваемые насосом равны напору ( $H_c$ ) и подаче ( $Q_c$ ), потребляемым системой. Поскольку произведение  $Q \cdot H$  представляет собой энергетическую характеристику, то для рабочей точки системы справедливо равенство энергий развиваемой насосом ( $H_n \cdot Q_n$ ) и потребляемой системой ( $H_c \cdot Q_c$ ).

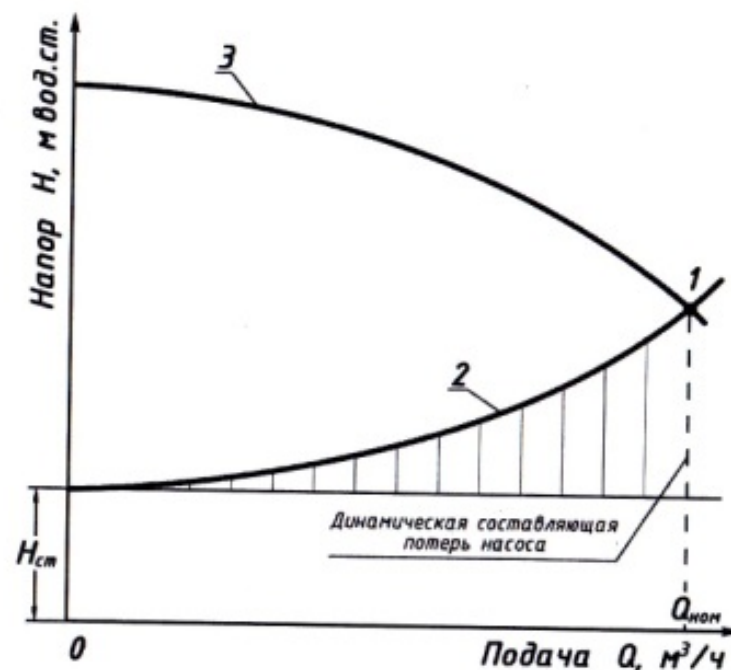


Рис. 2. Интерпретация работы центробежного насоса в составе трубопроводной системы в координатах «напор-подача»:  
1 — рабочая точка системы; 2 — характеристика системы;  
3 — характеристика насоса ( $Q-H$ ).

Рабочая точка системы используется для оценки режимов работы насосной установки.

Понятие рабочей точки является универсальным и часто используется в различных областях техники там, где необходимо анализировать работу источника энергии, и ее потребления.

В составе насосных установок используются насосы различных типов, наиболее распространенными из них являются лопастные и объемные. К классу лопастных относятся центробежные, вихревые, осевые, а к классу объемных — поршневые, шестеренные, винтовые, пластинчатые, радиально-поршневые, аксиально-поршневые.

ПРАВИЛА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
НАСОСОВ

Класс лопастных насосов имеет мягкую напорную характеристику, для которой значительное изменение подачи приводит к небольшому изменению напора, рис. 3 а). Класс объемных насосов имеет жесткую характеристику, для которой малое изменение подачи приводит к значительному изменению напора, рис. 3 б).

Эти различия в форме напорных характеристик насосов лопастного и объемного типов влияют на их техническое использование и должны учитываться в процессе эксплуатации.

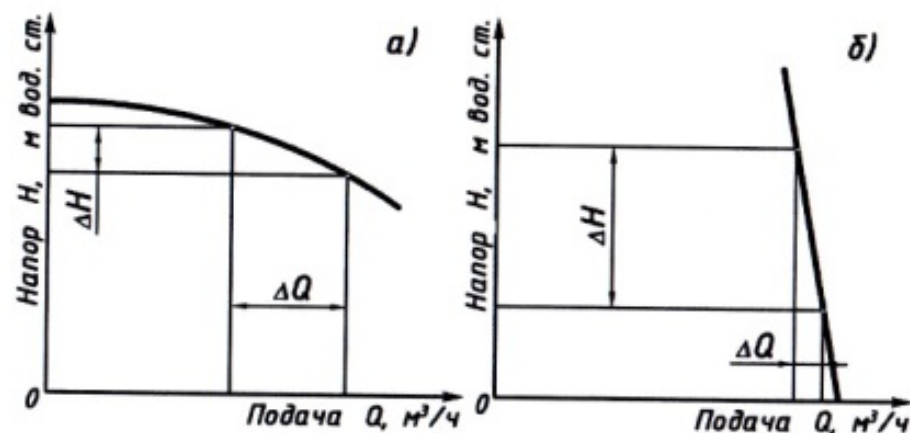


Рис. 3. Принципиальное различие напорных характеристик мягкой (а) и жесткой (б) насосов лопастного и объемного типов

Эксплуатация судовых технических средств осуществляется по двум основным направлениям:

1. Техническое использование (ТИ).
2. Техническое обслуживание (ТО).

Содержанием ТО является выполнения мероприятий, направленных на обеспечение исправности и ресурса. Содержанием ТИ является подготовка, ввод в действие, обслуживание во время работы, обнаружение и устранение неполадок, регулировка и вывод из действия.

Общие положения ТИ: Основным документом является инструкция завода изготовителя или судовладельца. При отсутствии указанных документов — правила ПТЭ СТС, 1997 г.

*В процессе технического использования запрещается:*

1. Вводить в действие неисправный насос.
2. Использовать масла и смазки, не предусмотренные инструкцией.
3. Обжимать соединения в узлах насоса во время их работы.

*Перед вводом в действие необходимо:*

1. Осмотреть помещение и убедиться в отсутствии подтеков перекачиваемой жидкости, посторонних предметов, наличии средств тушения пожара.
2. Осмотреть насос, убедиться в его исправности (все оборудование на своих местах, надежно закреплено, не имеет внешних повреждений, которые могут быть причиной отказа или аварии).
3. Проверить наличие смазки, при необходимости пополнить смазку.
4. Провернуть вал насоса, убедиться, что вал вращается свободно.
5. Подготовить систему к действию:
  - проверить наличие жидкости в расходной цистерне, замерить уровень;
  - спустить отстой воды и грязи;

- открыть клапан цистерны;
- открыть клапаны клапанной коробки;
- открыть всасывающий клапан, затем все повторить для приемной цистерны;
- открыть нагнетательный клапан насоса (центробежные насосы запускаются при закрытом нагнетательном клапане).

#### *Ввод в действие (пуск):*

1. Пустить электродвигатель.
2. Убедиться в отсутствии посторонних шумов.
3. Убедиться в отсутствии чрезмерного нагрева подшипников.
4. Проверить показания приборов.
5. Убедиться в отсутствии чрезмерных протечек.
6. Отрегулировать подачу насоса при необходимости.
7. При опасном уровне шума, протечек, нагрева — остановить насос и выяснить причину.
8. Устранить неисправность и ввести насос в действие.

#### *Обслуживание насосов:*

1. Убедиться в отсутствии шума.
2. Убедиться в отсутствии чрезмерных протечек.
3. Убедиться в отсутствии нагрева.
4. Проверить показания приборов.
5. При необходимости отрегулировать подачу.

При опасном уровне шума вывести насос из действия **НЕМЕДЛЕННО**, при необходимости подготовить и ввести в действие резервный насос.

#### *Вывод из действия (остановка):*

1. Остановить электродвигатель (у центробежного насоса предварительно закрыть нагнетательный клапан).
2. Закрыть всасывающий клапан и все клапаны в обратном порядке.
3. Осмотреть насос, убрать подтеки перекачиваемой жидкости.
4. Устранить неисправности, выявленные в процессе работы и в процессе осмотра.

#### *Характерные неполадки в работе*

1. Отсутствие подачи насоса:
  - закрыт всасывающий клапан насоса;
  - отсутствует жидкость в расходной цистерне;
  - не закрыт клапан клапанной коробки от смежной, пустой цистерны.
2. Недостаточная подача:
  - не полностью закрыт нагнетательный клапан;
  - подсосы воздуха — не полностью закрыт клапан клапанной коробки от смежной, пустой цистерны.
3. Двигатель работает с перегрузкой — высокая вязкость жидкости.
4. Посторонний шум:
  - износ подшипников;
  - несоосность вала насоса и приводного двигателя;
  - посторонние предметы в насосе;
  - поломка в насосе.
5. Чрезмерный нагрев в насосе:
  - отсутствие смазки в подшипнике;
  - неправильная установка подшипника.
6. Чрезмерные протечки:
  - износ сальника;
  - недостаточное обжатие;
  - неправильная установка уплотнения.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ  
в схемах судовых систем по ГОСТ

|                                                                                   |                                               |                                                                                    |                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
|   | Насос:<br>с постоянным<br>направлением потока |   | Вентилятор<br>центробежный                |
|   | ручной                                        |   | Двигатель тепловой<br>(общее обозначение) |
|   | центробежный                                  |   | Электродвигатель<br>(общее обозначение)   |
|   | шестеренный                                   |   | Тифон                                     |
|   | винтовой                                      |   | Клапан:<br>запорный проходной             |
|   | поршневой                                     |   | запорный угловой                          |
|   | Эжектор                                       |   | обратный проходной                        |
|   | Компрессор                                    |   | обратный угловой                          |
|   | Аппарат<br>(общее назначение)                 |   | невозвратно-<br>запорный                  |
|  | Фильтр для жидкости<br>или воздуха            |  | регулирующий                              |

|                                                                                       |                                                                        |                                                                                       |                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
|    | Сепаратор<br>(водомаслоотделитель)                                     |    | запорный<br>быстродействующий              |
|    | Охладитель жидкости<br>или воздуха                                     |    | самозапорный                               |
|    | Нагреватель жидкости<br>или воздуха                                    |    | предохранительный                          |
|    | Влаго- или маслоотдели-<br>тель с автоматическим<br>спуском конденсата |    | запорный с<br>дистанционным<br>управлением |
|    | Испаритель                                                             |    | к манометру                                |
|    | Конденсатоотводчик                                                     |    | трехходовой с<br>терморегулятором          |
|    | Манометр                                                               |    | трехходовой                                |
|    | Вакуумметр                                                             |    | редукционный                               |
|    | Мановакуумметр                                                         |    | дроссельный                                |
|    | Регулятор температуры                                                  |    | Задвижка клинкетная                        |
|    | Термометр жидкостный                                                   |    | Привод:<br>электромагнитный                |
|   | Фонарь смотровой                                                       |   | гидравлический                             |
|  | Кингстон:<br>приемный                                                  |  | пневматический                             |
|  | приемно-отливной                                                       |  | Водомер                                    |
|  | отливной (продувание)                                                  |  | Расходомер<br>ротационный                  |

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Лабораторная работа № 1.                                                    |    |
| Техническое использование лабораторной насосной установки .....             | 3  |
| Лабораторная работа № 2.                                                    |    |
| Снятие характеристики «напор-подача» центробежного насоса .....             | 12 |
| Лабораторная работа № 3.                                                    |    |
| Снятие характеристики «напор-подача» винтового насоса .....                 | 19 |
| Лабораторная работа № 4.                                                    |    |
| Параллельная работа центробежных насосов .....                              | 24 |
| Лабораторная работа № 5.                                                    |    |
| Последовательная работа центробежных насосов .....                          | 35 |
| Лабораторная работа № 6.                                                    |    |
| Регулирование подачи центробежного насоса дросселированием ..               | 43 |
| Лабораторная работа № 7.                                                    |    |
| Регулирование подачи центробежного насоса изменением частоты вращения ..... | 50 |
| Лабораторная работа № 8.                                                    |    |
| Регулирование подачи центробежного насоса перепуском .....                  | 56 |
| Лабораторная работа № 9.                                                    |    |
| Регулирование подачи винтового насоса перепуском .....                      | 63 |
| Лабораторная работа № 10.                                                   |    |
| Определение КПД центробежного насоса .....                                  | 71 |
| Приложение 1 .....                                                          | 76 |
| Приложение 2 .....                                                          | 77 |
| Приложение 3 .....                                                          | 81 |
| Приложение 4 .....                                                          | 84 |

Учебное издание

**Подволоцкий Николай Михайлович**, д-р. техн. наук, проф.

## **Судовые вспомогательные механизмы, устройства и системы**

*Методические указания*



198035, Санкт-Петербург, Межевой канал, 2

Тел.: (812) 748-97-19, 748-97-23

E-mail: [izdat@gumrf.ru](mailto:izdat@gumrf.ru)

*Публикуется в авторской редакции*

Ответственный за выпуск

*М. В. Беглецова*

Техническая редакция

и оригинал-макет

*О. С. Ермакова*

Подписано в печать 30.12.2019

Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman

Усл. печ. л. 5,5. Тираж 100 экз. Заказ № 534/19