

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра горных машин и комплексов

Составитель Н. В. Ерофеева

СТАЦИОНАРНЫЕ МАШИНЫ. ИСПЫТАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

**Методические указания к лабораторной (практической)
работе по дисциплинам «Стационарные машины»,
«Стационарные установки», «Стационарные установки
и транспорт»**

Рекомендовано учебно-методической комиссией специальности
21.05.04 Горное дело, специализации 21.05.04.09 Горные машины и оборудо-
вание, 10 Электрификация и автоматизация горного производства,
05 Шахтное и подземное строительство,
12 Технологическая безопасность и горноспасательное дело,
01 Подземная разработка пластовых месторождений,
направления подготовки 20.04.01 Техносферная безопасность
профиля 01 Безопасность технологических процессов и производств
в качестве электронного издания
для использования в образовательном процессе

Кемерово 2023

Рецензенты:

Ананьев К. А. – доцент, зав. кафедрой горных машин и комплексов, КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева, председатель учебно-методической комиссии специальности 21.05.04 Горное дело, 21.05.04.09 Горные машины и оборудование, 21.05.04.10 Электрификация и автоматизация горного производства

Кузнецов В. В. – доцент кафедры горных машин и комплексов, КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева

Ерофеева Наталья Валерьевна

Стационарные машины. Испытание центробежного насоса : методические указания к лабораторной (практической) работе по дисциплинам «Стационарные машины», «Стационарные установки», «Стационарные установки и транспорт» для студентов специальности 21.05.04 Горное дело, специализации 21.05.04.09 Горные машины и оборудование, 10 Электрификация и автоматизация горного производства, 05 Шахтное и подземное строительство, 12 Технологическая безопасность и горноспасательное дело, 01 Подземная разработка пластовых месторождений, направления подготовки 20.04.01 Техносферная безопасность профиля 01 Безопасность технологических процессов и производств всех форм обучения / сост. Н. В. Ерофеева; Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева. – Кемерово, 2023. – Текст : электронный.

Приводится порядок выполнения работы, необходимой для успешного освоения дисциплин «Стационарные машины», «Стационарные установки», «Стационарные установки и транспорт».

Назначение издания – помощь обучающимся в получении компетенций по дисциплинам «Стационарные машины», «Стационарные установки», «Стационарные установки и транспорт».

© Кузбасский государственный
технический университет
имени Т. Ф. Горбачева, 2023
© Ерофеева Н. В., составление 2023

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Цель работы – экспериментально определить индивидуальные действительные характеристики насоса в координатах $(Q; H)$, $(Q; N)$, $(Q; \eta)$.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1 –ознакомиться с устройством лабораторной установки, приемами заливки и запуска насоса;

2 –освоить методику экспериментального определения индивидуальных характеристик насоса;

3 –закрепить навыки работы с измерительными приборами и аппаратурой управления насосного агрегата;

4 –выполнить необходимые измерения, расчеты и анализ результатов.

2. УСТРОЙСТВО ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

2.1. Перечень оборудования и приборов

Центробежный насос		К-60	К80-50-200	К80-50-250
Асинхронный электродвигатель		КО2.2-4	4АМ160S2У3	АИР180S
Амперметр		Э378	Э378	Э378
Вольтметр		Э30	Э30	Э30
Фазометр		Д342	Д342	Д342
Манометр		МП4-У	ОБМВ-160	МП4-У
Мановакуумметр / Вакуумметр		ОБМВ-160	ОБМВ-160	ОБМВ-160
Водомер		ВТГ-80		
Объем мерного бака, м ³		1,6		
Объем водозаборного и приемного колодца, м ³		5		
Условный диаметр D_y патрубков насоса, мм:	всасывающего	100	80	80
	напорного	100	50	50
Наружный диаметр сливного трубопровода, мм		200		

2.2. Характеристики насоса К80-50-200

Действительная индивидуальная характеристика центробежного консольного насоса К80-50-200 с диаметром рабочего колеса, равного 215 мм, приведена на рис. 1.

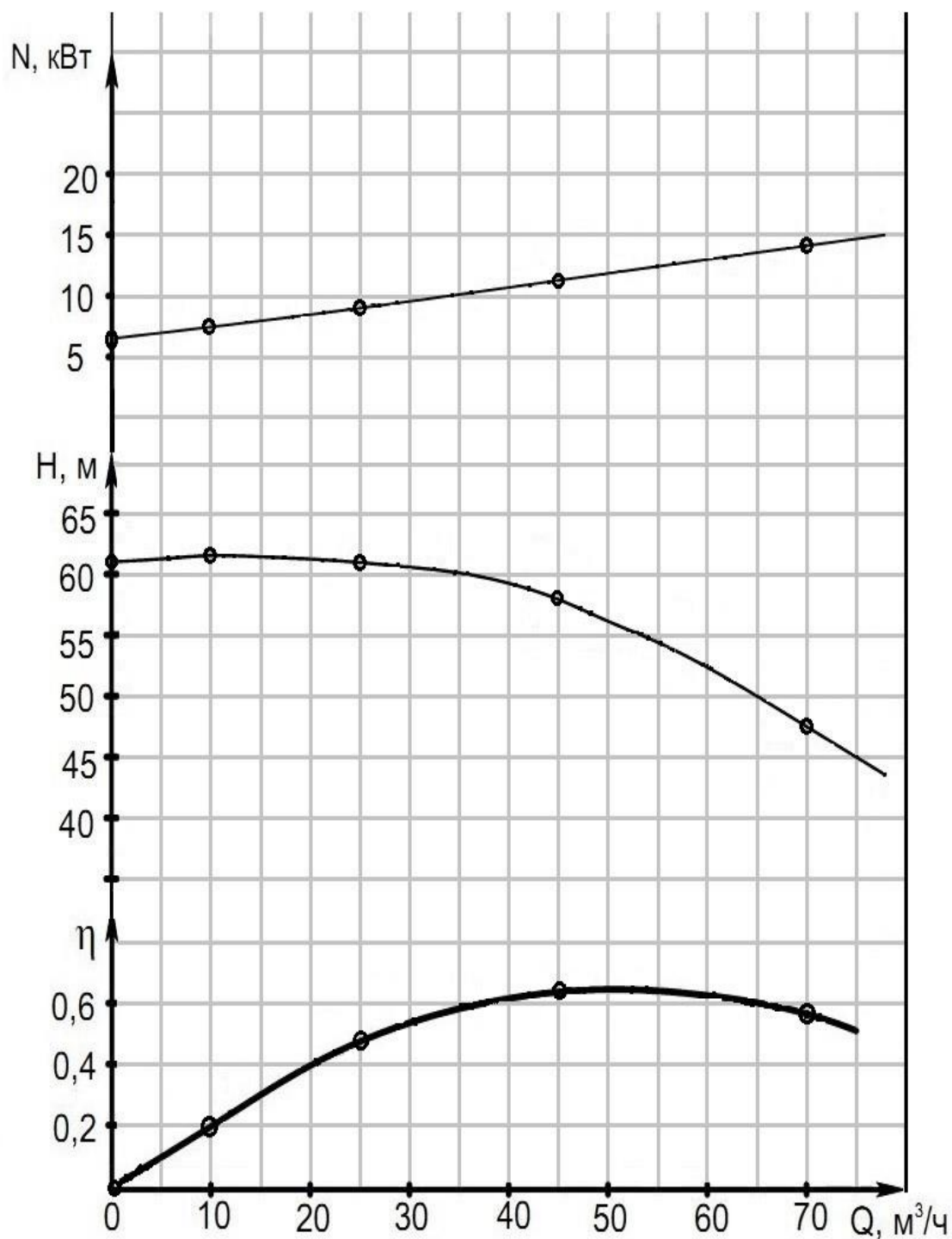


Рис. 1. Действительная индивидуальная характеристика центробежного консольного насоса К80-50-200

2.3. Техническая характеристика насосных агрегатов

Обозначение модели насоса		К-60	К80-50-200	К80-50-250
Тип конструкции насоса		консольный		
Параметры номинально- го режима:	подача Q_H , м ³ /ч	60	50	50
	напор H_H , м. вод. ст.	20	50	80
	КПД η_H	0,65	0,65	0,63
Частота вращения рабочего колеса, мин ⁻¹		1450	2900	2940
Мощность двигателя, кВт		20	15	22
Линейное напряжение при соединении обмоток в звезду, В		380	380	380
КПД двигателя $\eta_{дв}$		0,90	0,895	0,895
Коэффициент мощности $\cos \varphi$		0,85	0,89	0,905
Муфта упругая втулочно-пальцевая		250-30-1,2	-	-

2.4. Параметры трубопроводов и мерного бака

Длина трубопровода (м):	всасывающего	3,0
	напорного	10,0
	сливного	1,5
Сетка с клапаном, задвижки клиновые напорные, клапан обратный поворотный D_v (диаметр в дюймах)		4"
Задвижка сливная D_v (диаметр в дюймах)		8"
Размеры основания мерного бака, м:	длина	$a = 1,28$
	ширина	$b = 1,28$

2.4. Устройство насосной установки

Лабораторная установка состоит из консольного центробежного насоса 1 (рис. 2), соединенного упругой муфтой с асинхронным электродвигателем 2. Они смонтированы на общей стальной раме и установлены на бетонном фундаменте. В цепь питания двигателя включены амперметр A , вольтметр U и фазометр $\cos \varphi$. Приборы установлены на электроизмерительном щите (рис. 3). В колодец 3, наполненный водой, опущен всасывающий трубопровод 4. На его нижнем конце установлена сетка с клапаном. Верхний конец трубопровода прифланцован к всасывающему патрубку насоса. В верхнюю горизонтальную часть всасывающего трубопровода в непосредственной близости от

насоса врезан отвод вакуумметра W .

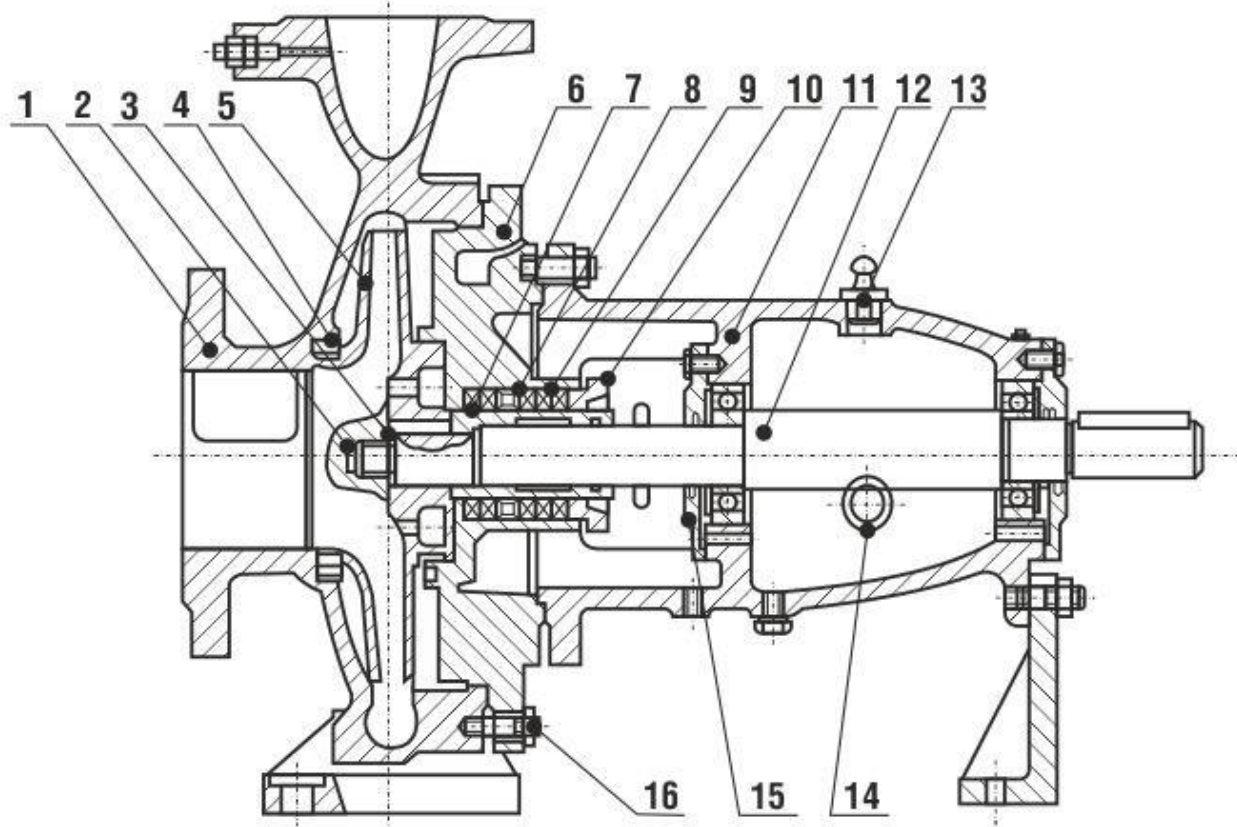


Рис. 2. Центробежный насос К80-50-200: 1 – корпус насоса; 2 – гайка рабочего колеса; 3 – шпонка; 4 – кольцо уплотнительное; 5 – рабочее колесо; 6 – крышка корпуса; 7 – защитная втулка; 8 – кольцо сальника; 9 – сальниковая набивка; 10 – фланец уплотнения; 11 – кронштейн; 12 – вал; 13 – пробка для заливки масла; 14 – контрольное окно; 15 – крышка подшипников; 16 – шпилька с гайкой

В специальное гнездо напорного патрубка насоса установлен отвод манометра M . Приборы M и W установлены на приборном щите, который расположен на краю колодца, между насосными агрегатами. Ось манометра расположена выше оси насоса.

На напорный фланец патрубка насоса через диффузор установлена задвижка 5, а к ней сверху прифланцован обратный клапан 6. В промышленных водоотливных установках обратный клапан должен располагаться после задвижки по ходу движения воды.

Напорный трубопровод 7 над мерным баком 11 имеет два отвода, которые оборудованы задвижками 8 и 9. Через задвижку 9 воду насосом можно подавать в мерный бак. Через задвижку 8 можно подать воду на водомер 10. В нижнем левом углу мерного

Рис. 3. Схема установки для испытания насоса:

- 1 – насос; 2 – электродвигатель; 3 – колодец;
- 4 – всасывающий трубопровод; 5, 8, 9, – задвижки;
- 6 – обратный клапан; 7– напорный трубопровод; 10

Рис. 3. Схема установки для испытания насоса:

1 – насос; 2 – электродвигатель; 3 – колодец;
4 – всасывающий трубопровод; 5, 8, 9, – задвижки;
6 – обратный клапан; 7 – напорный трубопровод; 10
– водомер; 11 – мерный бак; 12 – водомерная
трубка; 13 – сливная задвижка; 14 – сливной
трубопровод; 15 – заливочный вентиль;
16 – заливочный трубопровод; 17 – контрольный
вентиль.

7

управления сливной задвижки,отягощенный грузом, должен находиться в верхнем положении при закрытой задвижке для наполнения бака водой. Для сброса воды в колодец из бака или от водомера необходимо опустить рычаг сливной задвижки до упора вниз.

Для заливки насоса используется городская сеть холодной воды, откуда она под давлением 4–5 атм. через заливочный вентиль 15 по заливочному трубопроводу 16 подается в проставку (диффузор) между насосом и задвижкой 5. Для контроля заливки на корпусе насоса установлен контрольный вентиль 17, выходное отверстие которого расположено на уровне фланца напорного патрубка.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Общие положения

В основу методики определения действительных индивидуальных характеристик гидравлических машин, к которым относится и центробежный насос, положены следующие теоретические законы механики и гидравлики. Так как насос включен последовательно с остальными элементами трубопровода, поэтому, в соответствии с законом сохранения вещества, расход воды через любой его элемент, равен производительности насоса.

В соответствии с законом сохранения энергии приращение механической энергии, полученное потоком воды от рабочего колеса в насосе, затрачивается на совершение работы против сил тяжести (учитывается геометрической высотой подъема – H_r), на совершение работы против сил трения (гидравлические потери в трубопроводе) и на сохранение некоторой кинетической энергии на выходе из трубопровода.

Режим работы насосной установки определяется точкой пересечения напорных характеристик насоса и трубопровода (см. рис. 1). В этой точке производительность насоса равна расходу воды в любом элементе трубопровода, а напор, созданный рабочим колесом, равен потерям напора потоком жидкости в трубопроводе и на выходе из него с некоторой скоростью.

Для получения достоверных результатов необходимо произвести измерения для 8–12 стационарных рабочих режимов

нагружения насоса. Изменение производительности установки следует выполнять примерно равными шагами от нуля до максимальной величины и обратно так, чтобы средняя величина шага была равна $(0,08-0,12) Q_{\max}$.

Так как естественное изменение характеристик насоса при эксплуатации происходит с очень маленькой скоростью, поэтому во время испытаний при постоянной частоте вращения рабочего колеса их следует считать постоянными.

Тогда изменить режим работы насоса можно только за счет управления характеристикой трубопровода. Изменяя сопротивление трубопровода при помощи задвижек 5, 8, 9 (достаточно управлять одной из них) получают семейство рабочих точек (см. рис. 1). Так как все эти точки принадлежат характеристике насоса то, соединяя их плавной кривой стандартного вида, можно получить требуемую зависимость $H = f(Q)$.

3.2. Организация проведения испытаний

1. Ознакомиться с устройством лабораторной установки.
2. Ознакомиться с приемами заливки насоса и проверки правильности ее выполнения.
3. Ознакомиться с приемами запуска насоса.
4. Закрепить навыки работы с измерительными приборами и аппаратурой управления насосного агрегата.
5. Распределить обязанности среди обучающихся для выполнения необходимого объема работ на время испытаний насоса в лаборатории:
 - управление задвижкой 5;
 - управление задвижкой 13;
 - регистрация значений напряжения, тока и коэффициента мощности по приборам на электроизмерительном щите;
 - регистрация давления воды в напорном и всасывающем трубопроводе установки по M и W ;
 - регистрация показаний секундомера и водомера при открытой задвижке 8 (9 – закрыта, 13 – открыта) или водомерной трубки при открытой задвижке 9 (13 – закрыта).

Общая координация выполнения работ по всем измерениям и управлению насосной установкой осуществляется преподавателем кафедры горных машин и комплексов.

3.3. Заливка насоса

Запуск центробежного насоса без предварительной заливки его корпуса и всасывающего трубопровода водой категорически запрещен.

Для заливки насоса лабораторной установки необходимо выполнить в указанной последовательности следующие операции:

- 1) открыть полностью или частично задвижку 5;
- 2) открыть вентиль 17, если из него вытекает вода сплошной струей (без шипения и пузырьков воздуха) сразу перейти к п. 5;
- 3) открыть вентиль 15, который расположен под потолком аудитории над мерным баком;
- 4) наблюдать истечение воды из вентиля 17 до тех пор, пока не прекратится шипение, не исчезнут колебания струи по высоте, не исчезнут воздушные пузырьки в струе, и она станет прозрачной;
- 5) закрыть вентиль 17;
- 6) закрыть задвижку 5, после чего M и W должны показывать избыточное давление, из сальника должна капать вода или бежать тоненькой струйкой, постукивание стальным предметом по всасывающему трубопроводу должно сопровождаться глухим звуком;
- 7) закрыть вентиль 15.

Оставлять насос залитым без запуска в течение 2–5 минут не следует, так как вода вытекает из корпуса насоса через сальник и клапан в нижней части всасывающего трубопровода. Это может стать причиной срыва подачи при запуске насоса. При вращении рабочего колеса вода центробежной силой отжимается к стенкам корпуса, а в центре вокруг вала формируется область с пониженным давлением, поэтому даже частичное опорожнение корпуса приведет к разрыву потока воды на входе в колесо.

Для заливки второго насосного агрегата требуется выполнить аналогичную процедуру.

3.4. Запуск насоса

Перед нажатием кнопки «ПУСК» на электроизмерительном щите следует выполнить ряд операций, необходи-

мых для запуска насоса.

Для запуска насоса необходимо выполнить в указанной последовательности следующие операции:

- 1) убедиться, что задвижка 5 закрыта полностью;
- 2) открыть задвижку 8 или 9;
- 3) убедиться, что вентиль 17 закрыт полностью;
- 4) убедиться, что при давлении в городской сети 4–5 ат из сальника капает вода с частотой около 60 капель в минуту;
- 5) закрыть полностью вентиль 15 и проверить по M (его стрелка должна быстро опуститься к нулю);
- 6) на электроизмерительном щите быстро нажать черную кнопку «ПУСК» и через 0,5–1 с плавно отпустить;
- 7) с момента нажатия кнопки «ПУСК» внимательно слушать звук, издаваемый двигателем, до тех пор, пока его тональность прекратит повышаться – достижение максимального тона свидетельствует о наборе двигателем номинальной частоты вращения и завершении переходных процессов в питающей сети;
- 8) незамедлительно произвести измерения по приборам M , W , A , U , φ и занести результаты в таблицу как параметры первого режима нагружения насоса (этот пункт выполняется только при проведении испытаний);
- 9) плавно вращая маховик ($1\text{--}2\text{ мин}^{-1}$) открыть задвижку 5 до положения, при котором вода станет поступать в напорный трубопровод (контролировать: по шуму движущейся воды в трубопроводе и вибрации самого трубопровода; по движению стрелки водомера при открытой задвижке 8; по шуму воды падающей в мерный бак при открытой задвижке 9; по уровню воды в водомерной трубке при закрытой задвижке 13; по показанию вакуумметра отличного от нуля; по волнению поверхности воды в колодце 3).

Запуск насоса на открытую задвижку категорически запрещен во избежание гидравлического удара в трубопроводе и снижения активной внешней нагрузки на электродвигатель.

Продолжительность нормальной работы насоса на закрытую задвижку 5 зависит от технического состояния сальника, клапана во всасывающем трубопроводе и температуры воды. При хоро-

шем состоянии на лучших образцах отечественных насосов она может быть 10–15 минут, если температура воды ниже +20°C.

При плохом состоянии клапана во всасывающем трубопроводе во время запуска следует держать частично открытым вентиль 15, это исключит сброс подачи. Однако, перед измерениями по п. 8 следует полностью закрыть вентиль 15, что будет гарантировать получение результатов, характеризующих работу только одного насоса.

3.5. Приемы измерений физических величин

Применение водомера или мерного бака не позволяет устанавливать мгновенное значение производительности насоса. В данном случае это и не требуется, так как в большей части режимов нагружения насоса наблюдается турбулентное движение воды в трубопроводе. Измерения расхода воды в течение некоторого промежутка времени, автоматически устраняют возможные отклонения величины мгновенной скорости от ее средней скорости движения, обусловленные турбулентностью. Однако определение средней производительности автоматически обязывает экспериментаторов устанавливать средние значения параметров насоса, характеризующих его работу, в этот же самый промежуток времени. В этом случае регистрация результата измерений растягивается на десятки секунд или несколько минут, в течение которых показания приборов могут изменяться.

3.5.1. Измерения расхода по водомеру

1) пока большая стрелка водомера не пересекла на шкале отметку «0» (верхнее положение) выполнить отсчет по десятичной шкале, увеличить результат на единицу (a_1) и записать в протокол;

2) в момент прохождения большой стрелкой водомера отметки «0» на шкале включить секундомер (начать отсчет времени по часам с секундной стрелкой или с индикатором секунд t_1);

3) по истечению необходимого количества воды для определения Q с заданной погрешностью, пока большая стрелка водомера не пересекла на шкале отметку «0» (верхнее положение)

выполнить отсчет по десятичной шкале, увеличить результат на единицу (a_2) и записать в протокол;

4) в момент прохождения большой стрелкой водомера отметки «0» на шкале выключить секундомер (закончить отсчёт времени по часам с секундной стрелкой или с индикатором секунд – t_2).

Здесь следует подчеркнуть важность одновременного начала отсчета расхода воды и времени, равно как и одновременность окончания их отсчета.

3.5.2. Измерения расхода по мерному баку

Правильность измерения физических величин приборами со шкалой, например, уровня воды в баке, зависит от величины угла, под которым взгляд падает на шкалу. Чем ближе этот угол к 90° , тем точнее результат. В общем случае при использовании стрелочных приборов глаз экспериментатора в момент отсчета должен находиться на уровне конца стрелки.

В момент отсчета глаза экспериментатора должны находиться на одном уровне со столбиком воды в водомерной трубке, что автоматически гарантирует падение взгляда на метрическую шкалу под прямым углом. Для получения более точных результатов необходимо предварительно заполнить мерный бак водой на 400–500 мм, это позволит экспериментатору правильно занять местоположение при определении нижнего уровня.

Здесь следует сразу заметить, что, выполняя отсчет уровня воды в баке дважды, необходимо оба раза использовать один и тот же элемент мениска (верхнюю точку, нижнюю точку или середину).

1) установить карандаш или иной указательный инструмент на заранее выбранной отметке по метрической шкале (h_1) – нижний уровень;

2) расположить глаза на этом же уровне и в момент достижения столбика воды в водомерной трубке выбранной отметки включить секундомер или начать отсчет времени по часам с секундной стрелкой (t_1);

3) установить карандаш на заранее выбранной отметке по метрической шкале (h_2) – верхний уровень;

4) расположить глаза на этом же уровне и в момент достижения столбика воды в водомерной трубке выбранной отметки выключить секундомер или закончить отсчет времени по часам с секундной стрелкой (t_2).

3.5.3. Измерения давления по M и W

Нестабильность показаний M и W при работе насоса в разных режимах может являться следствием: турбулентности, кавитационного процесса во всасывающем трубопроводе при большом его гидравлическом сопротивлении и высоте всасывания, наличия помпажной зоны.

Характер и диапазон колебания стрелки зависит не только от перечисленных выше факторов, но и во многих случаях от инерционности самого прибора. Высокая инерционность или загрубленная чувствительность прибора не позволяет регистрировать модуляции сигнала, обусловленные турбулентностью и это хорошо, но при этом он может и «не слышать» изменения параметра с появлением кавитации или с переходом в помпажную зону характеристики насоса.

Низкая инерционность или завышенная чувствительность прибора, как правило, является причиной большого разброса результатов даже при стационарных режимах нагружения.

В такой ситуации точность измерения характеристик псевдо-стационарных процессов стрелочными приборами может в значительной степени зависеть и от навыков экспериментатора. Необходимо использовать известные приемы для пяти основных случаев поведения стрелки прибора:

1) стрелка прибора в течение всего времени регистрации измеряемого параметра оставалась неподвижной в этом случае следует зарегистрировать величину, указанную стрелкой;

2) стрелка прибора в течение всего времени регистрации измеряемого параметра медленно, без остановок перемещалась, например, от начального положения «2» до конечного – «4» – в этом случае следует зарегистрировать величину, равную среднему значению – 3;

3) стрелка прибора в течение всего времени регистрации измеряемого параметра совершала колебательные движения с

разной или постоянной частотой между двумя значениями, например, от 1,2 до 1,8 – в этом случае следует зарегистрировать величину, равную среднему значению – 1,5;

4) стрелка прибора в течение всего времени регистрации измеряемого параметра совершала колебательные движения с разной или постоянной частотой сначала между значениями, например, от 2,2 до 2,8; а позже между значениями 2 и 4, далее возможен опять переход в более узкий диапазон. В этом случае следует зарегистрировать среднее значение более узкого диапазона;

5) стрелка прибора в течение всего времени регистрации измеряемого параметра совершала колебательные движения с разной или постоянной частотой сначала между значениями, например, от 2,2 до 2,8, а позже между значениями 3,2 и 3,4; здесь необходимо обратить внимание на продолжительность колебаний стрелки в первом и во втором диапазоне, если продолжительность колебаний стрелки в первом диапазоне в 2–3 раза дольше, чем во втором – в этом случае следует зарегистрировать среднее значение первого диапазона – 2,5.

3.6. Порядок проведения измерений

Для работы насоса в 8–12 различных режимах необходимо изменять напорную характеристику трубопровода. Это достигается плавными изменениями положения маховика задвижки 5. По команде преподавателя обучающийся, управляющий задвижкой, выполняет 2–3 оборота маховиком в заданном направлении. Число рабочих режимов при открывании задвижки и закрывании должно быть равным или отличаться не более чем на единицу. Рабочие параметры при нулевой производительности насоса следует регистрировать во время его запуска (3.4. п.8).

После каждого изменения положения задвижки необходимо выждать 1–2 минуты для достижения в системе стационарного движения воды (с постоянной скоростью во всех точках по длине трубопровода) и только после этого по команде «ЗАМЕР» произвести измерения по приборам в течение одного промежутка времени. Экспериментаторы, производящие измерения по приборам, должны произвести запись для регистрации его в соответ-

ствующей строчке таблицы. Следующий рабочий режим насоса устанавливается изменением положения задвижки только после того, как все результаты измерений параметров предыдущего режима будут занесены в таблицу.

После завершения всех измерений подается команда «СТОП» и экспериментатор, регистрирующий показания приборов на электроизмерительном щите, должен быстро нажать красную кнопку «стоп» и плавно отпустить ее. Обучающийся, управляющий сливной задвижкой, должен перевести ее в положение «открыто» – рычаг вниз.

Результаты измерений всем присутствующим перенести в таблицу отчета.

4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1. Определение производительности насоса

Производительностью насоса называется объем жидкости, подаваемый им в напорный трубопровод в единицу времени. В системе СИ объемная производительность имеет размерность $\text{м}^3/\text{с}$, но во многих отраслях промышленности, в различных производствах и в быту широко используется в России размерность $\text{м}^3/\text{ч}$.

Существует несколько методов экспериментального определения расхода жидкости в трубопроводе: водомеры, мерные баки, водосливы, сужающие устройства в трубопроводе (диафрагмы, сопла, трубы Вентури), трубки динамического давления и другие [1–4]. Выбор конкретного метода определения производительности зависит от условий (схема установки, расположение основного и вспомогательного оборудования, продолжительность испытаний, подготовленность экспериментаторов и другие) и необходимой точности. В условиях учебной лаборатории производительность определяется по мерному баку или водомеру. При использовании правильных приемов измерений и соблюдении ряда рекомендаций оба способа гарантируют погрешность определения производительности не более 1 %.

4.1.1. Определение производительности по мерному баку

При закрытой задвижке 13 вода поступает в бак по напорному трубопроводу и постепенно заполняет его, о чем свидетельствует положение уровня воды в прозрачной водомерной трубке 12 (см. рис. 3). Регистрируя время заполнения бака (t) и объем поступившей в него воды (ΔV), подачу ($\text{м}^3/\text{с}$) насоса можно определить по формуле:

$$Q = \frac{\Delta V}{t} = \frac{a \cdot b \cdot (h_2 - h_1)}{(t_2 - t_1)}, \quad (1)$$

или, если подача измеряется в $\text{м}^3/\text{ч}$:

$$Q = \frac{3600 \cdot a \cdot b \cdot (h_2 - h_1)}{(t_2 - t_1)}, \quad (2)$$

где a и b – размеры основания мерного бака (см. п. 2.3), м;

h_2 и h_1 – отметка по метрической шкале конечного и начального уровня воды в мерном баке, м;

$(t_2 - t_1)$ – разность конечного и начального показания часов с секундной стрелкой или индикатором, с.

4.1.2. Определение производительности по водомеру.

Турбинный водомер ВТГ-80 (поз. 10 рис. 3) имеет условный диаметр 80 мм, пределы измерения от 1,9 до 110 $\text{м}^3/\text{ч}$. Порог чувствительности 0,7 $\text{м}^3/\text{ч}$ (турбина прибора остается неподвижной). Погрешность измерения в рабочем диапазоне не более 2 %. В диапазоне расхода от 0,7 до 1,9 $\text{м}^3/\text{ч}$ погрешность измерений может достигать 10 %. Максимальное избыточное давление 1 МПа.

Применение водомеров с меньшим условным проходом, например, ВСТ-25 возможно путем его установки в байпасе, с последующим пересчетом результата на сечение основного трубопровода.

$$Q = \frac{3600 \cdot (a_2 - a_1)}{(t_2 - t_1)}, \quad (3)$$

где a_2 и a_1 – величина конечного и начального отсчета по шкале водомера, м^3 .

4.2. Определение напора насоса

Напором насоса называется приращение удельной механической энергии потока жидкости, полученное им при взаимодействии с рабочим колесом (рабочими колесами насоса). Так как полная механическая энергия потока отнесена к его весу, поэтому напор имеет размерность $[\text{Дж} \cdot \text{с}^2 / \text{кг} \cdot \text{м}] = [\text{Дж} / \text{Н}] = [\text{м. ст. ж.}]$. Обычно – $[\text{м вод. ст.}]$.

$$H = (Z_2 - Z_1) + \frac{(P_2 - P_1)}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g}, \quad (4)$$

где Z_1 – расстояние по вертикали от оси насоса до поверхности воды в колодце, м;

Z_2 – расстояние по вертикали от оси насоса до выходного сечения напорного трубопровода, м;

P_1 – статическое давление на поверхность воды в колодце, Па;

P_2 – статическое давление на поток жидкости в выходном сечении напорного трубопровода, Па;

v – скорость движения потока жидкости в выходном сечении напорного трубопровода, м/с;

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

g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$ (Н/кг).

Сумма двух первых членов уравнения Бернулли характеризует приращение потенциальной энергии потока жидкости и называется статическим напором – $H_{\text{ст}}$. Последний член уравнения характеризует кинетическую энергию потока жидкости на выходе из напорного трубопровода и называется динамическим или скоростным напором – $H_{\text{дин}}$. Поэтому уравнение Бернулли имеет и более простой вид:

$$H = H_{\text{ст}} + H_{\text{дин}}. \quad (5)$$

Для лабораторной установки статический напор насоса обусловлен разрежением, созданным во всасывающем трубопроводе и избыточным давлением в нагнетательном трубопроводе. Его величина определяется в общем случае по показаниям M и W , но при выполнении точных исследований следует учитывать местоположение M относительно оси насоса.

Величина динамического напора при умеренных скоростях

движения жидкости 2,0–4,0 м/с не превышает 0,5–1,0 м и поэтому часто не учитывается, когда полный напор оценивается в несколько десятков метров. Для лабораторной установки при определении напора насоса следует пользоваться формулой:

$$H = 10 \cdot (M + W) + l, \quad (6)$$

где 10 – переводной коэффициент для показаний M и W из [атм] в [м.вод.ст.];

l – расстояние, измеренное по вертикали от оси рабочего колеса насоса до центра шкалы манометра, для лабораторной установки $l = 0,85$ м.

В промышленных установках при соотношении показаний $M \gg W$ и расположении манометра на уровне фланца напорного патрубка, где для этого предусмотрено специальное гнездо, и в этом случае $l \approx 0$, напор насоса можно определять с погрешностью не более 2% как:

$$H = 10 \cdot M \quad (7)$$

4.3. Определение гидродинамической мощности

Гидродинамическая или полезная мощность (Вт) характеризует работу, которую совершает поток за единицу времени:

$$N_{\Pi} = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \quad (8)$$

или с учетом, что для воды $\rho = 1000$ кг/м³ и $[Q] = \text{м}^3/\text{с}$

$$N_{\Pi} = g \cdot H \cdot Q, \quad (9)$$

или при $[Q] = \text{м}^3/\text{ч}$

$$N_{\Pi} = \frac{g \cdot H \cdot Q}{3,6}. \quad (10)$$

4.4. Определение мощности на валу насоса

Мощность (кВт) на валу насоса характеризует, ту часть энергии, потребляемую двигателем из электрической сети, которая преобразуется им в механическую работу и учитывает ее потери в подшипниках, уплотнениях и на крыльчатке самого двигателя.

$$N_B = 1,73 \cdot U_L \cdot I \cdot \eta_{\text{ДВ}} \cdot \cos \varphi, \quad (11)$$

где I – сила тока в статорной обмотке двигателя (линейный), А;
 U_L – линейное напряжение в электрической сети, кВ;
 $\cos \varphi$ – коэффициент мощности двигателя, ед.;
 $\eta_{\text{ДВ}}$ – коэффициент полезного действия двигателя, ед. (см. п. 2.2).

4.5. Определение КПД насоса

Коэффициент полезного действия насоса показывает, какую часть энергии рабочее колесо (колеса) передало потоку жидкости:

$$\eta = \frac{N_{\text{п}}}{N_B}. \quad (12)$$

Результаты расчетов Q , H , $N_{\text{п}}$, N_B и η для всех рабочих режимов насоса занести в нижнюю часть табл. 1. Ниже таблицы привести пример расчетов для одного из режимов нагружения насоса.

4.6. Определение погрешностей измерений

Любое измерение всегда выполняется с погрешностью, величина которого зависит от класса точности прибора, правильности его использования, квалификации и физической кондиции экспериментатора.

Абсолютная погрешность определяется разницей между истинным (x) и измеренным (a) значением (между точным числом и его приближением) и сохраняет размерность параметра.

$$\Delta_a = |x - a|. \quad (13)$$

Относительная погрешность определяется отношением абсолютной погрешности к измеренной величине, поэтому размерности не имеет (в единицах или в долях единицы)

$$\delta_a = \frac{\Delta_a}{a}. \quad (14)$$

Таблица 1

Результаты измерений и расчетов параметров насоса

№ режима	1	2	3	4	5	6	...	12
результаты измерений								
M , ат								
W , ат								
Δh , м								
t , с								
$U_{\text{Л}}$, кВ								
I , А								
$\cos \varphi$, ед								
результаты расчетов								
Q , м ³ /ч								
H , м								
$N_{\text{П}}$, кВт								
$N_{\text{В}}$, кВт								
η , ед								

Использование стандартных стрелочных и цифровых приборов существенно упрощает определение δ_a , так как ее величина задается классом точности самого прибора, который указывается на шкале или в маркировке (в крайнем случае, можно найти в паспорте). Следует отметить, что относительная погрешность измерения зависит не только от самого прибора (цена деления шкалы, физический размер деления шкалы, толщина риски, ширина конца стрелки, наличие зеркальной подложки), а еще и от положения наблюдателя, остроты его зрения и внимательности. Бытует мнение, что абсолютную погрешность следует всегда принимать равной половине цены деления стрелочного прибора. Этот подход обоснован в случаях использования шаговых и цифровых приборов. В проводимых испытаниях это касается только измерений времени. При измерении давления и электрических параметров квалифицированный экспериментатор, имеющий навыки обращения с приборами данного типа, в привычных условиях способен выполнять измерения с относительной погрешностью на 1–2 класса меньше, чем гарантирует прибор.

В общем случае, ориентируясь на экспериментатора без

подготовки (обучающийся), следует принимать относительную погрешность, равной классу точности прибора. Например, если класс точности прибора 1, $\delta_a = 0,01$.

Подготовленный экспериментатор с хорошим зрением в статике может различать отрезки, длина которых отличается на 1,0–1,5 мм. В динамике эта величина возрастает до 1,5–3,0 мм.

4.6.1. Погрешности измерения давления и электрических параметров

Значения абсолютных погрешностей – Δ при измерении электрических параметров и давления подготовленным экспериментатором можно принять из табл. 2.

Таблица 2

Значения абсолютных погрешностей Δ

Наименование и марка прибора	Класс точности	Цена деления	Ширина деления	Δ
Амперметр Э378	1,5	2А	6-8	0,4-0,5А
Вольтметр Э30	1,5	20В	5-6	4-5В
Фазометр Д342	1,5	0,05	5-6	0,01
Манометр ОБМВ-160	1,5/2,5	0,1/0,2ат	10	0,02/0,04ат
Вакуумметр ОБВ1-160	1,5	0,02ат	10	0,005ат

4.5.2. Определение погрешности измерения напора

С учетом выражения (4) относительная погрешность измерения напора – δ_n следует определять как:

$$\delta_a = \delta_m + \delta_w + \delta_l \quad (15)$$

где δ_m и δ_w – относительная погрешность измерения давления по манометру и вакуумметру, соответственно;

δ_l – относительная погрешность измерения величины $l = 0,85$ м.

Принимают $\delta_l = 0,005$.

4.5.3. Определение погрешности измерения времени

При использовании часов с секундной стрелкой следует

принимать $\Delta t = 1$ с.

Использование механических секундомеров с ценой деления 0,1 с или электронных секундомеров с точностью 0,001 с не дают основания сократить Δt в 10–1000 раз, так как реакция экспериментатора 0,2–0,3 с. Так как при измерении времени необходимо выполнить два действия (включить и остановить секундомер), поэтому следует принять $\Delta t = 0,5$ с.

4.5.4. Определение погрешности измерения высоты наполнения мерного бака

Внутренний диаметр водомерной трубки 5 мм, поэтому при заполнении ее водой наблюдается отрицательный (вогнутый) мениск высотой 4–5 мм. Так как измерения уровня воды в баке всегда производятся в динамике, поэтому следует применять $\Delta h = 2,0$ – $2,5$ мм не менее.

Высота наполнения мерного бака определяется разностью уровней воды в конце и в начале отсчета времени, поэтому относительную погрешность измерения высоты наполнения – δ_h следует определять как:

$$\delta_h = \frac{2 \cdot \Delta h}{h}, \quad (16)$$

4.5.5. Определение погрешности измерения объема воды по водомеру

Водомер ВТГ-80, класс точности 2; цена деления шкалы $0,01 \text{ м}^3$; ширина деления шкалы 3 мм. Следует принять $\Delta v = 0,005 \text{ м}^3$.

Объем воды, прошедший через водомер, определяется разностью его показаний в конце и в начале отсчета времени, поэтому относительную погрешность измерения объема – δ_v следует определять как:

$$\delta_v = \frac{2 \cdot \Delta V}{v} \quad (17)$$

4.5.6. Определение погрешности измерения

Погрешности измерения определяются для следующих параметров (производительности, полезной мощности, мощности на валу и КПД):

при использовании мерного бака

$$\delta_Q = (\delta_h^2 + \delta_t^2)^{1/2} \quad (18)$$

при использовании водомера

$$\delta_Q = (\delta_v^2 + \delta_t^2)^{1/2} \quad (19)$$

для измерения полезной мощности

$$\delta_\Pi = (\delta_h^2 + \delta_Q^2)^{1/2} \quad (20)$$

для измерения мощности на валу

$$\delta_B = (\delta_I^2 + \delta_U^2 + \delta_\varphi^2)^{1/2} \quad (21)$$

для определения КПД

$$\delta_\eta = (\delta_\Pi^2 + \delta_B^2)^{1/2} \quad (22)$$

4.6. Аппроксимация действительных характеристик насоса

Аппроксимация действительных характеристик насоса является одним из важных этапов обработки экспериментальных данных. Ее следует выполнять с учетом значений относительной погрешности установленных параметров в разных диапазонах производительности, а также учитывая положение области применения насоса (рабочей зоны).

При наличии двенадцати экспериментальных точек по каждой из трех характеристик насоса цель аппроксимации получить аналитические выражения функций $H = f(Q)$, $N = f(Q)$ и $\eta = f(Q)$, которые с максимальным приближением описывали бы этот четырехмерный массив. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1) выбрать аппроксимирующую функцию (для каждой характеристики отдельно, с учетом паспортных характеристик

насоса);

2) установить точки жесткой привязки аппроксимирующей функции (такими точками являются экстремумы, для которых следует зафиксировать значения производительности по паспортным характеристикам и точка при нулевой производительности);

3) по возможности аналитически ввести координаты точек привязки в уравнение аппроксимирующей функции, если это сложно, следует увеличить общее число экспериментальных точек за счет увеличения в 5–10 раз числа точек привязки (без изменения их координат);

4) выполнить статистические расчеты среднеквадратичного отклонения для нескольких аппроксимирующей функций во всем диапазоне производительности, а при необходимости и отдельно для рабочей зоны;

5) сравнить значения среднеквадратичных отклонений для разных аппроксимирующих функций и выбрать 1–2 с минимальными значениями суммарных отклонений;

6) оценить совместимость аппроксимирующей функции с доверительным интервалом, который обусловлен погрешностями измерений, и выбрать лучшую из них.

Решение ряда перечисленных задач может быть успешно реализовано на персональном компьютере с использованием стандартных приложений.

4.7. Построение графиков действительных индивидуальных характеристик насоса

Графики действительных индивидуальных характеристик насоса следует выполнить на отдельном листе или на миллиметровой бумаге формата А4 (см. рис. 1).

Для каждого графика должны быть нанесены все экспериментальные точки, даже те точки, которые по каким-либо причинам не учитывались при аппроксимации. Об этом в отчете должна быть сделана запись с пояснениями и расчетами.

Графики должны занимать всю ширину листа с учетом размеров стандартных полей. Графики следует располагать один под другим по всей высоте листа, с соблюдением полей, без

наложения экспериментальных точек и пересечения характеристик. Характеристика $H = f(Q)$ должна занимать 0,4–0,5 высоты листа, две других – примерно в равных долях.

Шкалы графиков должны быть линейными и иметь значения через 5–10 мм. Они должны иметь обозначения параметров насоса и единицы измерения. Толщина линии для шкалы должна быть 0,8–1 мм. Толщина линий координационной сетки – 0,3–0,5 мм. Толщина линии графика – 2–3 мм.

В нижней части этого листа должна быть запись с номером и наименованием рисунка.

4.8. Анализ результатов и формулировка вывода

Для обоснования вывода о техническом состоянии насоса необходимо сравнить паспортное и действительное значение КПД при номинальной производительности. Нормы технической эксплуатации допускают использование в промышленных установках насосов с КПД, величина которого может быть меньше паспортного не более чем на $0,1\eta_{max}$. Поэтому минимальное допустимое значение КПД насоса $\eta_{доп}$ следует определять по формуле:

$$\eta_{доп} = 0,9 \cdot \eta_{max} \quad (23)$$

Если во всем диапазоне изменения производительности насоса нет ни одной точки, в которой выполняется это условие, то в качестве примера формулировки вывода может быть использована следующая редакция. **ВЫВОД:** насос К80-50-200 к эксплуатации не пригоден, так как максимальное значение КПД насоса составило 0,52 при минимально допустимом значении КПД, равном 0,58 (при $Q_H = 50 \text{ м}^3/\text{ч}$ паспортное значение КПД равно 0,65).

Если хотя бы в одной точке это условие выполняется, то в качестве примера формулировки вывода может быть использована следующая редакция. **ВЫВОД:** насос К80-50-200 пригоден к эксплуатации с подачей от 45 до 55 $\text{м}^3/\text{ч}$, поскольку действительный КПД изменяется в пределах 0,58–0,62.

При более детальной формулировке вывода в несколько пунктов, с оценкой по нескольким параметрам или критериям,

следует перед выводом перечислить эти показатели с указанием допустимых величин. При составлении вывода необходимо выполнять следующие правила:

7) наличие двух частей – мотивирующей и постановляющей (могут располагаться в любой последовательности);

8) лаконичное изложение обеих частей (без вступлений, причастных и деепричастных оборотов и т.п.);

9) излагать простым языком с использованием общепринятой терминологии, обозначений и сокращений для данного направления техники (использованных, в том числе и в самом отчете);

10) формулировки должны исключать возможность их многозначного толкования;

11) редакция должна исключить необходимость выполнения даже простейших расчетов, для подтверждения правильности вывода;

12) вывод должен быть не более трех строк.

5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

1. Перед проведением лабораторной работы каждый студент должен ознакомиться с требованиями правил безопасности, расписаться в журнале инструктажа и в дальнейшем самостоятельно нести полную ответственность за соблюдение правил безопасности.

2. Включение и выключение двигателя насоса производить только по команде преподавателя, проводящего работу.

3. Перед включением двигателя насоса и при дальнейшей работе установки строго соблюдать порядок действий с задвижками вентилями, изложенный в п. 3.4

4. При достижении уровня воды в мерном баке отметки 1 м открыть без промедления сливную задвижку 13 и сбросить воду в колодец.

5. Запрещается оставлять работающую насосную установку без контроля показаний манометра и уровня воды в мерном баке.

6. При сбросе насосом давления до нуля (контролировать по манометру) без промедления снять напряжение с элек-

тродвигателя нажатием красной кнопки «СТОП» на электроизмерительном щите и доложить преподавателю причину остановки.

7. В случае появления ненормального шума, скрежета, стука и других неисправностей при работе установки немедленно снять напряжение с электродвигателя нажатием красной кнопки «СТОП» на электроизмерительном щите и доложить преподавателю причину остановки.

8. В случае возникновения пожара, староста группы или его заместитель должен без промедления:

- отключить электроэнергию на распределительном щите в препараторском отсеке лаборатории, рычаг разъединителя потянуть на себя и вниз;

- сообщить об этом преподавателю; сообщить о пожаре в пожарную часть;

- принять безотлагательные меры по ограничению и ликвидации пожара имеющимися средствами пожаротушения (огнетушители, песок, ограничение поступления свежего воздуха в зону горения).

6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

6.1. Оформление отчета

Каждый студент, в установленный преподавателем срок, обязан подготовить индивидуальный отчет, в котором должна быть систематизированная в параграфы информация следующего содержания.

1. Цель работы.
2. Схема установки для испытания насоса.
3. Паспортные данные испытуемого насоса.
4. Формулы для обработки результатов измерений с расшифровкой параметров и указанием единиц измерения.

5. Результаты произведенных измерений, занесенные в таблицу.

6. Результаты расчетов параметров Q , H , $N_{\text{п}}$, $N_{\text{в}}$, η , занесенные в таблицу.

7. Пример расчета рабочих параметров насоса для одного

из режимов нагружения.

8. Аппроксимационные графические зависимости действительных эксплуатационных характеристик насоса с обязательным указанием всех экспериментальных точек.

9. Вывод – заключение о техническом состоянии насоса на основании анализа действительных и паспортных характеристик.

10. Один или два листа чистой бумаги для защиты отчета.

Оформление отчета следует выполнять в соответствии с действующими нормами ЕСТД и ЕСКД на формате А4. Допускается выполнять отчет в тетради.

6.2. Защита отчета

1. К защите допускаются студенты с оформленными отчетами в соответствии с п.6.1.

2. После проверки полноты и правильности оформления отчета, преподаватель оценивает качество выполнения графических материалов и вывод.

3. В случае выявленных недочетов работа возвращается студенту. После устранения недоделок и ошибок в отчете студент индивидуально защищает свой отчет, отвечая в письменном виде на вопросы преподавателя.

4. Преподаватель записывает в отчет вопрос №1, а студент дает на него в письменном виде ответ. Следующий вопрос студент получает только после правильного ответа на предыдущий вопрос.

5. При подготовке к защите для проверки своих знаний студент может использовать базовые вопросы, приведенные в п.7.

6. Защита заканчивается положительной отметкой при наличии правильных письменных ответов на три вопроса, записанных преподавателем.

7. Правильные ответы на письменные вопросы преподавателя учитываются при повторных защитах отчета на консультациях, если студент не уложился во время проведения планового занятия.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Устройство насосной установки (см. рис. 3)

1. Пояснить назначение задвижек 5, 8 и 9.

2. Пояснить назначение задвижки 13.
3. Поз. 2 (см. рис. 3) содержит условное обозначение. Что оно означает?
4. Что указывает стрелка на корпусе насоса?
5. Какие задвижки необходимо открыть или закрыть для измерения подачи насоса водомером?
6. Указать способы проверки наличия воды в насосе (произведена ли была заливка насоса перед пуском)?
7. Каким образом производится заливка насоса в лабораторной установке?
8. В каком положении должна быть задвижка 5 при заливке насоса?
9. В каком положении при запуске насоса должна быть задвижка 5? Обосновать почему.
10. Почему не допускается длительная работа на закрытую задвижку 5?
11. Каким образом производится набивка сальника?
12. Какие операции необходимо произвести перед включением кнопки «пуск»?
13. В каком положении следует держать вентиль 15 при проведении испытания насоса и почему?
14. В каком положении следует держать задвижку 13 при измерении производительности насоса по водомеру и почему?

7.2. Приборы и измерения

1. Как включаются амперметр, вольтметр и фазометр в сеть?
2. Почему отвод на M должен быть как можно ближе к насосу?
3. Почему при определении H по формуле (6) учитывается l ?
4. Как необходимо производить измерения при определении производительности насоса по мерному баку?
5. Как необходимо производить измерения при определении производительности насоса по водомеру?
6. Почему после каждого замера производительности необходимо воду из мерного бака сбросить в колодец?
7. Как необходимо производить измерения давления?
8. Почему после изменения положения задвижки 5 не следу-

ет сразу производить измерения рабочих параметров насоса?

9. Доказать, что в формуле (11) для определения мощности на валу должен быть коэффициент 1,73.

10. Доказать, что в формуле (6) необходим коэффициент 10.

11. Что означают « a » и « b » в формуле для определения подачи?

7.3. Определение рабочих параметров

1. Почему при увеличении подачи уменьшается напор?

2. Построить характеристику сети для n -ного опыта.

3. Определить Q , H , $N_{\text{в}}$, если КПД составляет 45%.

4. Определить Q , H , и $N_{\text{в}}$, если $\eta = 0,5$.

5. Определить величину R и записать уравнение характеристики сети при работе насоса с КПД 50%, если $H_{\text{Г}} = 3,5$ м.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Гришко, А. П. Т.2. Рудничные водоотливные, вентиляторные и пневматические установки: Учебник для вузов / А. П. Гришко – Москва : Изд-во Московского государственного горного университета, 2007 – 585 с.

Вспомогательная литература

2. Гришко, Л. П., Шелоганов В. И. Стационарные машины и установки: учеб. пособие для вузов / А. П. Гришко, В. И. Шелоганов. – Москва : Изд-во Московского государственного горного университета, 2004. – 328с.

3. Попов, В. М. Шахтные насосы (теория, расчет, эксплуатация): справ. пособие / В. М. Попов. – Москва : Недра, 1993. – 224 с.

4. ГОСТ 6134–2007 Насосы динамические. Методы испытаний. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 101 с.