

М. В. БОДРОВ, В. Ю. КУЗИН, М. С. МОРОЗОВ

**ПРАКТИКУМ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ  
ХАРАКТЕРИСТИК И РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ НАСОСОВ**

***wilo***

Нижний Новгород  
2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

М. В. Бодров, В. Ю. Кузин, М. С. Морозов

## Практикум по исследованию характеристик и режимов работы циркуляционных насосов

Утверждено редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия

Нижегород  
ННГАСУ  
2021

ББК 31.56: 38.762  
Б75  
УДК 621.671

*Печатается в авторской редакции*

**Рецензенты:**

- А. Г. Рымаров* – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
*Е. Г. Ионычев* – канд. техн. наук, директор по строительству ООО «ВЕНТОГАРАНТ»

Бодров М. В. Практикум по исследованию характеристик и режимов работы циркуляционных насосов [Текст]: учеб. пос. для вузов / М. В. Бодров, В. Ю. Кузин, М. С. Морозов; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2021. – 39 с.  
ISBN 978-5-528-00469-3

Приведён практикум по исследованию характеристик современных циркуляционных насосов и обслуживаемых ими гидравлических сетей при ручном регулировании, в режимах поддержания постоянного и переменного перепадов давления, а также их совместной работы при последовательном и параллельном соединении.

Предназначено для обучающихся по направлениям подготовки бакалавриата 08.03.01 Строительство, профиль Теплогазоснабжение и вентиляция, и 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль Промышленная теплоэнергетика, а также магистратуры направлений 08.04.01 Строительство, профили Теплогазоснабжение и вентиляция и Энергосбережение и повышение энергетической эффективности зданий, и 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль Тепломассообменные процессы и установки. Пособие может быть полезно для научных работников, инженеров и аспирантов технических специальностей.

ББК 31.56: 38.762

ISBN 978-5-528-00469-3

© М. В. Бодров, В. Ю. Кузин,  
М. С. Морозов, 2021  
© ННГАСУ, 2021

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование характеристик современных циркуляционных центробежных насосов и обслуживаемых ими гидравлических сетей, а также режимов их совместной работы, является обязательным для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавриата 08.03.01 Строительство, профиль Теплогазоснабжение и вентиляция, и 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль Промышленная теплоэнергетика, а также магистратуры направлений 08.04.01 Строительство, профили Теплогазоснабжение и вентиляция и Энергосбережение и повышение энергетической эффективности зданий, и 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль Теплообменные процессы и установки. Представленные в учебном пособии материалы могут быть использованы при обучении студентов по программам действующих курсов «Нагнетатели и тепловые двигатели», «Отопление», «Современные методы контроля теплового режима и приборы теплотехнических измерений» и многих других.

Актуальность и новизна учебного пособия «Практикум по исследованию характеристик и режимов работы циркуляционных насосов» заключается в теоретическом и практическом анализе базовых гидравлических характеристик и основ работы актуального насосного оборудования, применяемого в современных теплоэнергетических системах гражданских и промышленных зданий, таких как системы отопления, внутреннего тепло- и холодоснабжения вентиляционных установок и центральных кондиционеров, а также автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов.

Учебное пособие состоит из двух основных разделов. Первый из которых посвящён описанию унифицированной лабораторной установки заводского изготовления, разработанной фирмой Wilo (ООО «ВИЛО РУС»), и содержит общие теоретические сведения о характеристиках и режимах работы центробежных насосов. Во втором разделе изложен лабораторный практикум по исследованию основных гидравлических и электрических характеристик, а также показателей эффективности центробежных насосов при различных режимах их работы. Внешний вид лабораторной установки приведён на рисунке.



Рисунок – Внешний вид лабораторной установки

Приведённый в пособии практикум включает в себя 8 лабораторных работ, порядок проведения которых изложен последовательно по каждой из них.

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам учебного пособия: кандидату технических наук, заведующему кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции Андрею Георгиевичу Рымарову (ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»); кандидату технических наук, директору по строительству ООО «ВЕНТОГАРАНТ» Евгению Геннадьевичу Ионычеву, а также сотрудникам фирмы Wilo (ООО «ВИЛО РУС»). Авторы учли при редактировании ценные советы и замечания, сделанные при рецензировании рукописи учебного пособия.

# 1 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Практикум по исследованию характеристик и режимов работы циркуляционных насосов предполагает использование унифицированной лабораторной установки заводского изготовления, фирмы Wilo (ООО «ВИЛО РУС», рис. 1.1), закреплённой на стенде 16, размещённой на опорной раме 17.

Установка представляет собой замкнутый гидравлический контур (систему), оборудованный двумя центробежными циркуляционными насосами Wilo-Stratos MAXO 40/0,5-12 и Wilo-TOP-S 40/10 (рис. 1.1, 1 и 2), а также электромагнитным расходомером 3. Предполагается три основных режима:

- независимой работы насосов по отдельности (один из насосов выключен);
- совместной работы насосов, соединённых параллельно;
- совместной работы насосов, соединённых последовательно.

Включение/выключение насосов осуществляется переключателями 12 и 13, фиксация потребляемой при их работе мощности ваттметрами 10 и 11.

Измерение избыточных давлений в местах входа и выхода воды из циркуляционных насосов проводится с помощью манометров 7.

Отключение и подключение отдельных трубопроводов к системе ведётся с помощью шаровых кранов 8. Для предотвращения обратного течения жидкости через участки системы, оборудованные циркуляционными насосами, на них дополнительно предусмотрены обратные клапаны 9.

Расходомер 4 используется для измерения расхода воды (производительности насоса/насосов), проходящего через контур. Балансировочный клапан 3 необходим для изменения характеристики сопротивления системы, как следствие увеличения, либо уменьшения потерь давления и подачи насосов.

Слив и заполнение системы водой осуществляются через шаровой кран 5. Удаление воздуха проводится через автоматические воздухоотводчики 6. Для более эффективного обезвоздушивания рекомендуется запускать насосы в различных режимах (независимом, параллельном и последовательном).

Для компенсации изменения объёма воды в контуре, вызванного тепловым расширением теплоносителя предусмотрен расширительный бак 14.

Подключение к сети 220 В показывает сигнал «Питание включено».

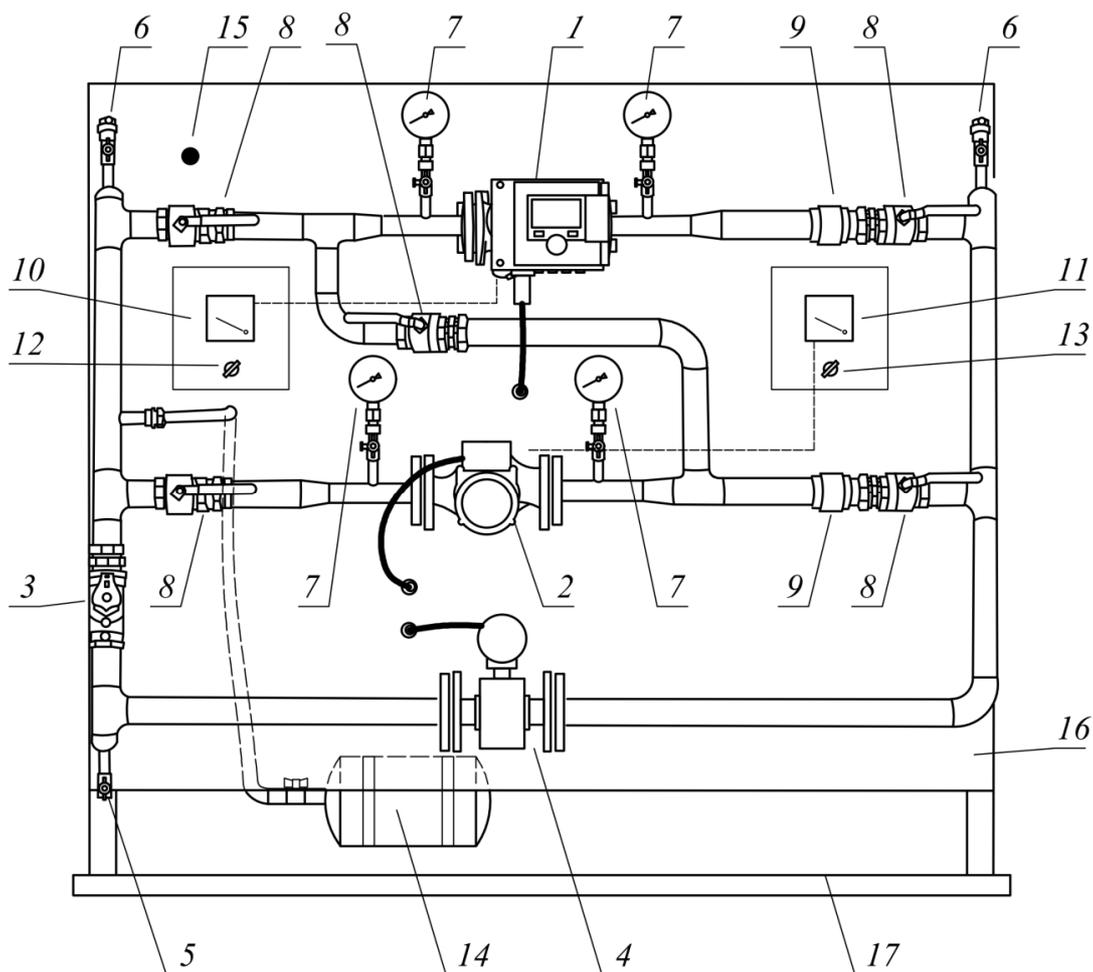


Рисунок 1.1 – Схема лабораторной установки: 1, 2 – циркуляционные насосы; 3 – ручной балансировочный клапан; 4 – расходомер; 5 – спускник; 6 – автоматические воздухоотводчики; 7 – манометры; 8 – шаровые краны; 9 – обратные клапаны; 10, 11 – ваттметры; 12, 13 – переключатели; 14 – расширительный бак; 15 – сигнал «Питание включено»; 16 – стэнд; 17 – рама

### 1.1 Циркуляционные насосы

Лабораторная установка оборудован двумя насосами ООО «ВИЛО РУС», внешний вид которых приведен на рисунках 1.2 и 1.3, технические и рабочие характеристики – в таблицах 1.1...1.2 и на рисунках 1.4...1.6 [11, 12].

**Запуск центробежных насосов** следует проводить при закрытых шаровых кранах на напорных трубопроводах, краны на всасывающей линии при этом необходимо открыть. В данном случае насосы будут работать с неполной нагрузкой, что значительно облегчит запуск электродвигателей. Когда насос разовьёт полное число оборотов открывают кран на напорном трубопроводе. Для предотвращения нагрева воды, находящейся в корпусе насоса продолжительность его работы при закрытой задвижке не должна превышать 2...3 минут.

**Центробежный насос Wilo-TOP-S 40/10** (рис. 1.2) оборудован клеммной коробкой 4 с трехступенчатым ручным переключателем числа оборотов. Корпус насоса 1 помещён в специальный теплоизоляционный кожух 6.

**Центробежный насос Wilo-Stratos MAXO 40/0,5-12** (рис. 1.3) оборудован электронным модулем регулирования 10 и способен работать в режимах:

- поддержания постоянной частоты вращения вала (рис. 1.4);
- поддержания напора  $H$ , м вод. ст., постоянным ( $\Delta p = \text{const}$ ) в заданном интервале расходов до максимальной характеристики (рис. 1.5, сплошные линии);
- поддержания напора  $H$  в линейной зависимости от объёмного расхода  $Q$ , м<sup>3</sup>/ч ( $\Delta p = \text{variable}$ ), для указанного интервала расходов и заданных минимального и максимального значений напоров (рис. 1.5, штриховые линии).

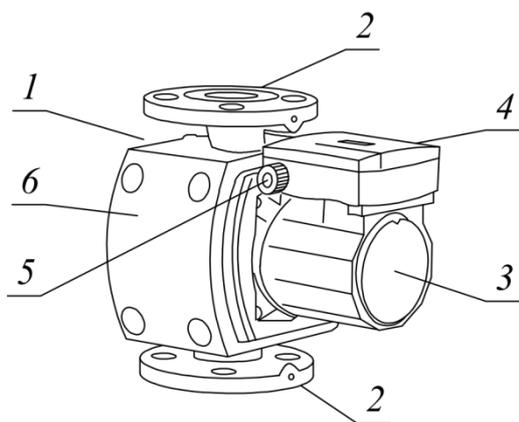


Рисунок 1.2 – Насос Wilo-TOP-S 40/10:  
 1 – корпус; 2 – соединительные фланцы; 3 – электродвигатель;  
 4 – клеммная коробка с переключателем частоты вращения;  
 5 – подключение к электросети;  
 6 – теплоизоляционный кожух

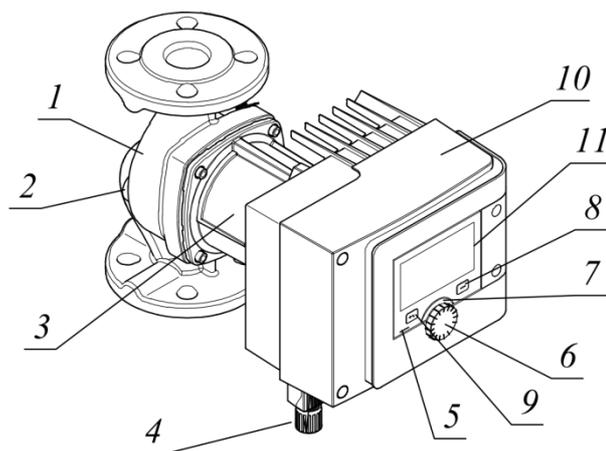


Рисунок 1.3 – Насос Wilo-Stratos MAXO 40/0,5-12: 1 – корпус; 2 – указатель направления тока жидкости; 3 – электродвигатель;  
 4 – подключение к сети; 5 – синий светодиод; 6 – кнопка управления; 7 – зелёный светодиод; 8 – кнопка «контекст»; 9 – кнопка «назад»; 10 – электронный модуль регулирования; 11 – жидкокристаллический дисплей

Таблица 1.1 – Технические характеристики насоса Wilo-Stratos MAXO 40/0,5-12

Наименование характеристики, ед. изм.	Значение
Максимальное рабочее давление, бар	10
Максимальный напор, м вод. ст.	12
Минимальное избыточное давление на входе в насос при температурах теплоносителя 50 / 95 / 110 °С, м вод. ст.	5 / 12 / 18
Диапазон рабочих температур теплоносителя, °С	-10...110
Диапазон рабочих температур окружающей среды, °С	-10...40
Подключение к электрической сети, В / Гц	1~230 ±10 % / 50...60
Частота вращения минимальная / максимальная, об/мин	650 / 3600
Потребляемая мощность минимальная / номинальная / максимальная, Вт	10 / 479 / 570

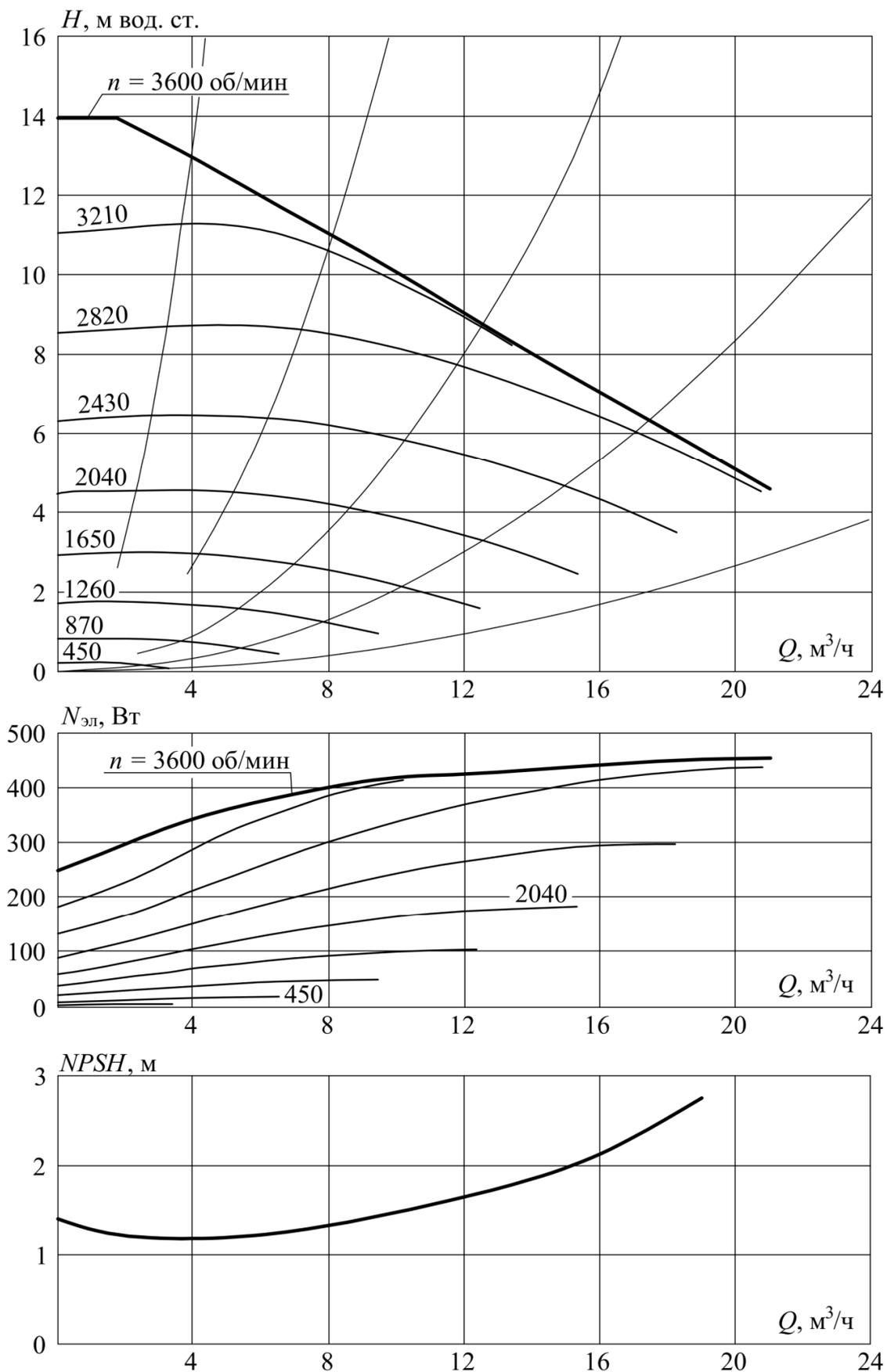


Рисунок 1.4 – Рабочие характеристики насоса Wilo-Stratos МАХО 40/0,5-12 в режиме поддержания постоянной частоты вращения, где  $NPSH, \text{ м}$  – net positive suction head (чистый положительный напор на всасывании «высота всасывания насоса», пер. с англ.)

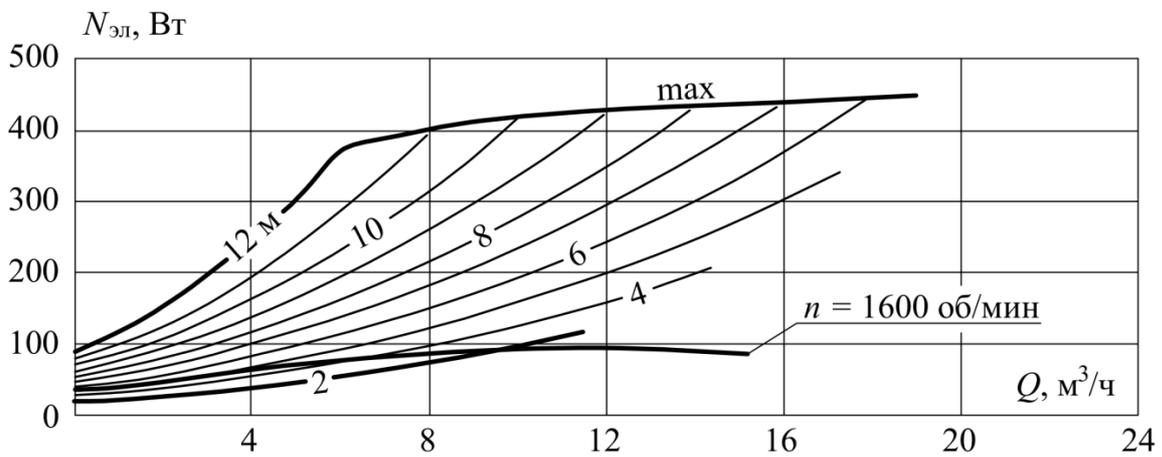
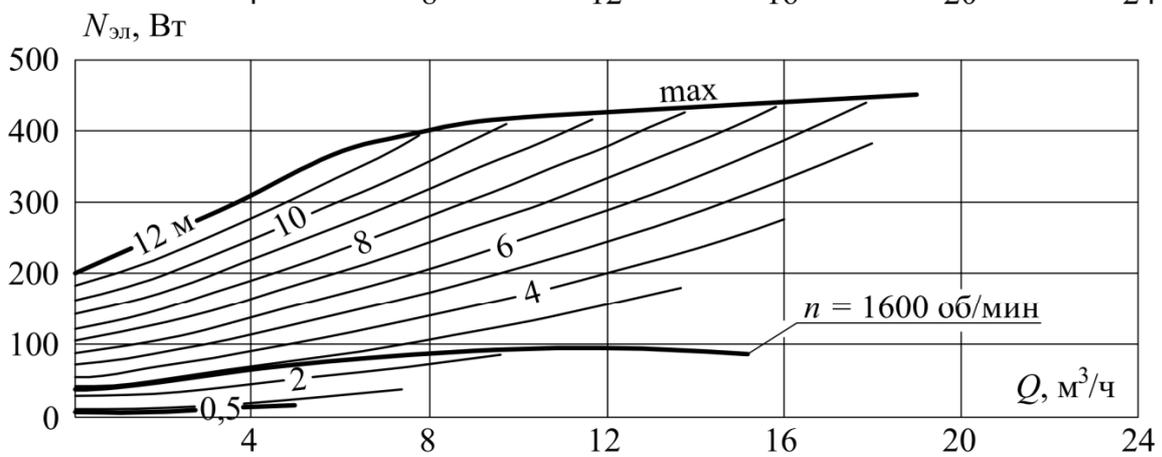
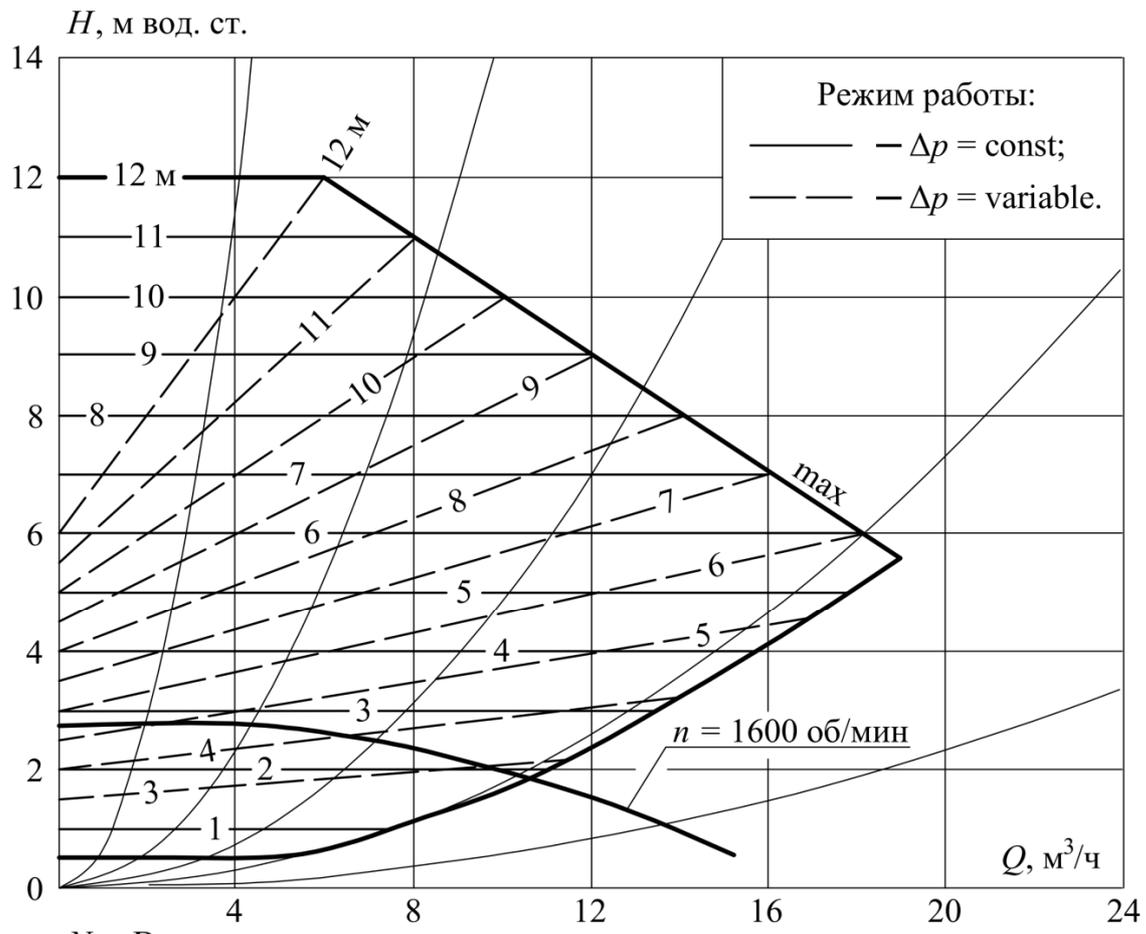


Рисунок 1.5 – Рабочие характеристики насоса Wilo-Stratos MAXO 40/0,5-12 в режимах поддержания постоянного и переменного перепада давления

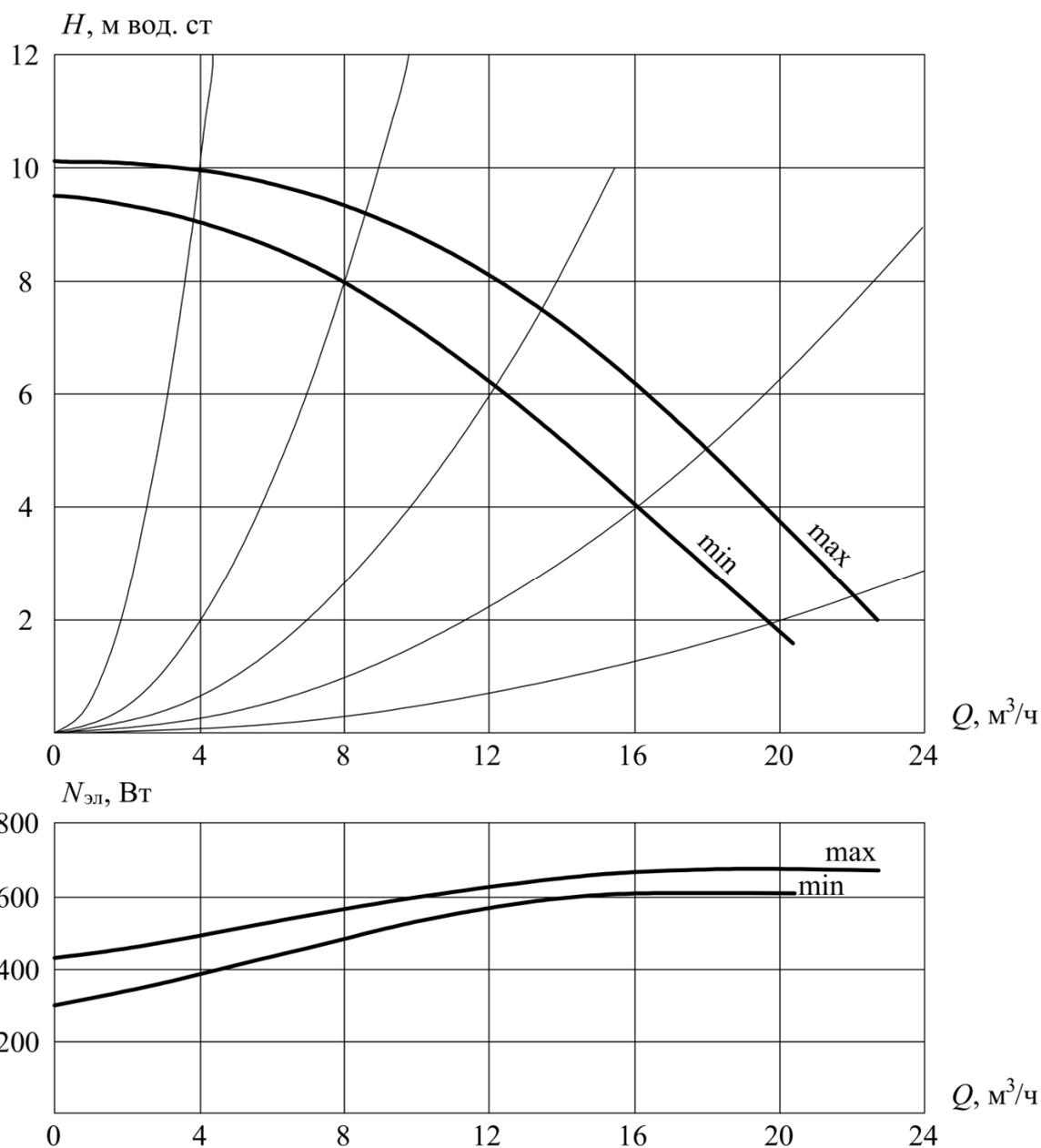


Рисунок 1.6 – Рабочие характеристики насоса Wilo-TOP-S 40/10

Таблица 1.2 – Технические характеристики насоса Wilo-TOP-S 40/10

Наименование характеристики, ед. изм.	Значение
Номинальный диаметр, мм	40
Диапазон рабочих температур (при температуре окружающей среды $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), $^{\circ}\text{C}$	$-20 \dots 130$
Подключение к электрической сети, В / Гц	1~230 / 50
Частота вращения ротора, об/мин	0 / 2600 / 2800
Потребляемая мощность $N_{\text{эл}}$ , Вт	0 / 610 / 680
Ток $I$ , А	0 / 3,18 / 3,47
Максимально допустимое рабочее давление $p_{\text{раб}}$ , бар	6/10
Материалы: - корпуса; - рабочего колеса; - вала насоса; - подшипников.	серый чугун; синтетический материал; нержавеющая сталь; графит

**Электронный модуль регулирования** 10 насоса Wilo-Stratos MAXO 40/0,5-12 оборудован жидкокристаллическим дисплеем 11 с кнопками 6, 8 и 9, необходимыми для управления режимами его работы, обмена данными с внешними интерфейсами, индикации ошибок, предупреждений и других функций. Программный интерфейс модуля подробно описан в инструкции по эксплуатации [11].

## 1.2 Контрольно-измерительные приборы и средства регулирования

Рассматриваемая лабораторная установка включает в себя следующие контрольно-измерительные приборы и средства регулирования:

- показывающие манометры, ЗАО «РОСМА», 4 шт.;
- показывающие ваттметры, 2 шт.;
- электромагнитный счётчик-расходомер РС-50-36, 1 шт.;
- балансировочный клапан STAD 50, фирма IMI, 1 шт.

**Показывающие манометры** (рис. 1.7 [6]) предназначены для контроля избыточных давлений у всасывающего и нагнетательного патрубков циркуляционных насосов. Диапазоном измерений – 0...0,4 МПа, цена деления – 0,05 МПа.

**Показывающие ваттметры** (рис. 1.8) используются для измерения фактической электрической мощности потребляемой насосами  $N_{эл}$ , Вт (кВт).

**Электромагнитный счётчик-расходомер** РС-50-36 (рис. 1.9 [8]) используется для определения расхода жидкости, проходящей через контур  $Q$ , м<sup>3</sup>/ч, значения которого отображаются на индикаторе 4 электронного блока 5.

**Балансировочный клапан** (рис. 1.10 [1]) необходим для регулирования характеристики сопротивления циркуляционного контура. Клапан оборудован специальной рукояткой 3, которая предназначена для регулирования числа оборотов штока клапана (рис. 1.11) от полного закрытия «0» до полного открытия «4», а также установления промежуточной настройки до десятых долей оборота.

Основной гидравлической характеристикой клапана является его коэффициент пропускной способности  $k_v$ , м<sup>3</sup>/ч·бар<sup>0,5</sup> (табл. 1.3), равный

$$k_v = \frac{Q_{кл}}{\sqrt{\Delta p_{кл}}}, \quad (1.1)$$

где  $Q_{кл}$  – объёмный расход воды через клапан, м<sup>3</sup>/ч, для лабораторной установки  $Q_{кл} = Q$ ;  $\Delta p_{кл}$  – перепад давления на клапане, бар, 1 бар = 10<sup>5</sup> Па.

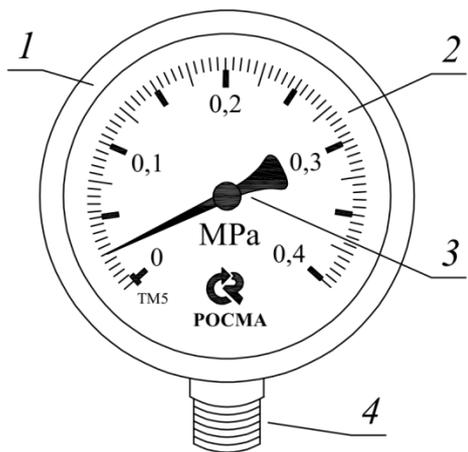


Рисунок 1.7 – Показывающий манометр ЗАО «РОСМА»: 1 – корпус; 2 – шкала; 3 – указывающая стрелка; 4 – резьба

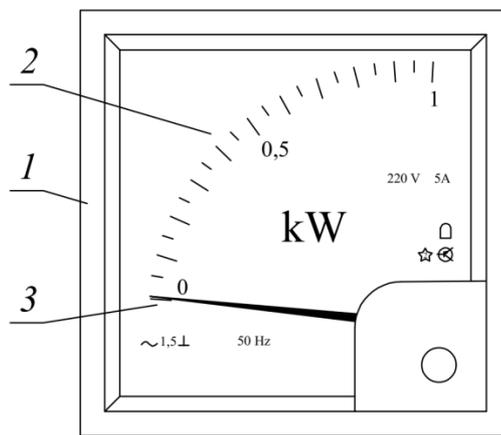


Рисунок 1.8 – Показывающий ваттметр: 1 – корпус; 2 – шкала; 3 – указывающая стрелка

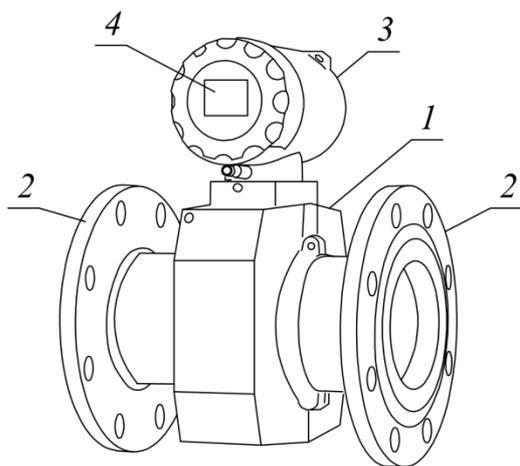


Рисунок 1.9 – Электромагнитный счётчик-расходомер РС-50-36: 1 – корпус; 2 – фланцы; 3 – электронный блок; 4 – графический индикатор

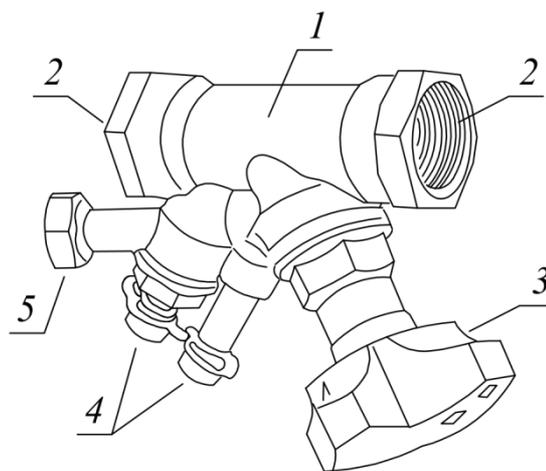


Рисунок 1.10 – Балансировочный клапан STAD 50, фирма IMI: 1 – корпус; 2 – резьбовое соединение; 3 – рукоятка; 4 – измерительные штуцеры; 5 – дренаж

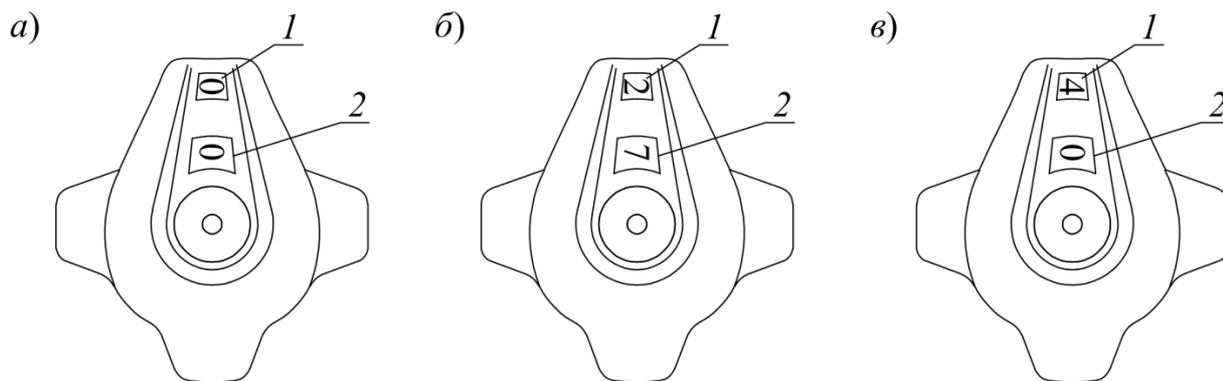


Рисунок 1.11 – Настройка клапана STAD 50 (а – полное закрытие; б – промежуточное положение; в – полное открытие): 1 – отсчёт целого числа оборотов; 2 – отсчёт доли оборота

Таблица 1.3 – Настройки балансировочного клапана STAD 50

Число оборотов, шт.	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$k_v, \text{ м}^3/\text{ч} \cdot \text{бар}^{0,5}$	2,56	4,20	7,20	11,7	16,2	21,5	26,5	33,0

## 1.3 Общие сведения о характеристиках и режимах работы насосов

### 1.3.1 Характеристика гидравлической сети

Центробежные насосы как правило работают в **гидравлической сети**, которая представляет собой систему трубопроводов различной протяженности и конфигурации, включающую запорно-регулирующую арматуру, трубопроводные фитинги и прочие элементы. Энергия, передаваемая насосом перемещаемой жидкости, расходуется на преодоление гидравлического сопротивления сети, которое равно суммарным потерям давления во всех элементах этой сети.

Зависимость суммарных потерь напора в сети  $\Delta H_c$ , м вод. ст., от объемного расхода  $Q_c$ , м<sup>3</sup>/с, перемещаемой через сеть среды называется **характеристикой гидравлической сети**. Она зависит от плотности перемещаемой среды, скорости течения и конфигурации элементов сети. В большинстве случаев эта зависимость представляется квадратичной параболой [4]:

$$\Delta H_c = SQ_c^2, \quad (1.2)$$

где  $S$  – характеристика сопротивления сети, м вод. ст./(м<sup>3</sup>/с)<sup>2</sup>, зависит от формы, длины участков сети и от плотности перемещаемой среды.

Характеристику проектируемой сети определяют расчетным путём, а реальных систем – экспериментально, путем измерения потерь напора (давления) во всасывающем и нагнетательном трактах или по разности полных давлений в выходном и входном сечениях насоса, установленного в этой сети.

Наиболее распространены гидравлические сети, имеющие характеристики, представляющие из себя параболу и соответствующие выражению (1.2), однако встречаются сети и с иными характеристиками (рис. 1.12):

- $\Delta H_c = \text{const}$  – сети с постоянным статическим сопротивлением (кривая 1);
- $\Delta H_c = \Delta H_0 + SQ_c^2$  – сети с турбулентным режимом течения жидкости и постоянным начальным сопротивлением  $\Delta H_0$  (кривая 2);
- $\Delta H_c = SQ_c^2$  – сети с турбулентным режимом течения жидкости (кривая 3);
- $\Delta H_c = kQ_c$  – сети с ламинарным режимом течения жидкости (кривая 4).

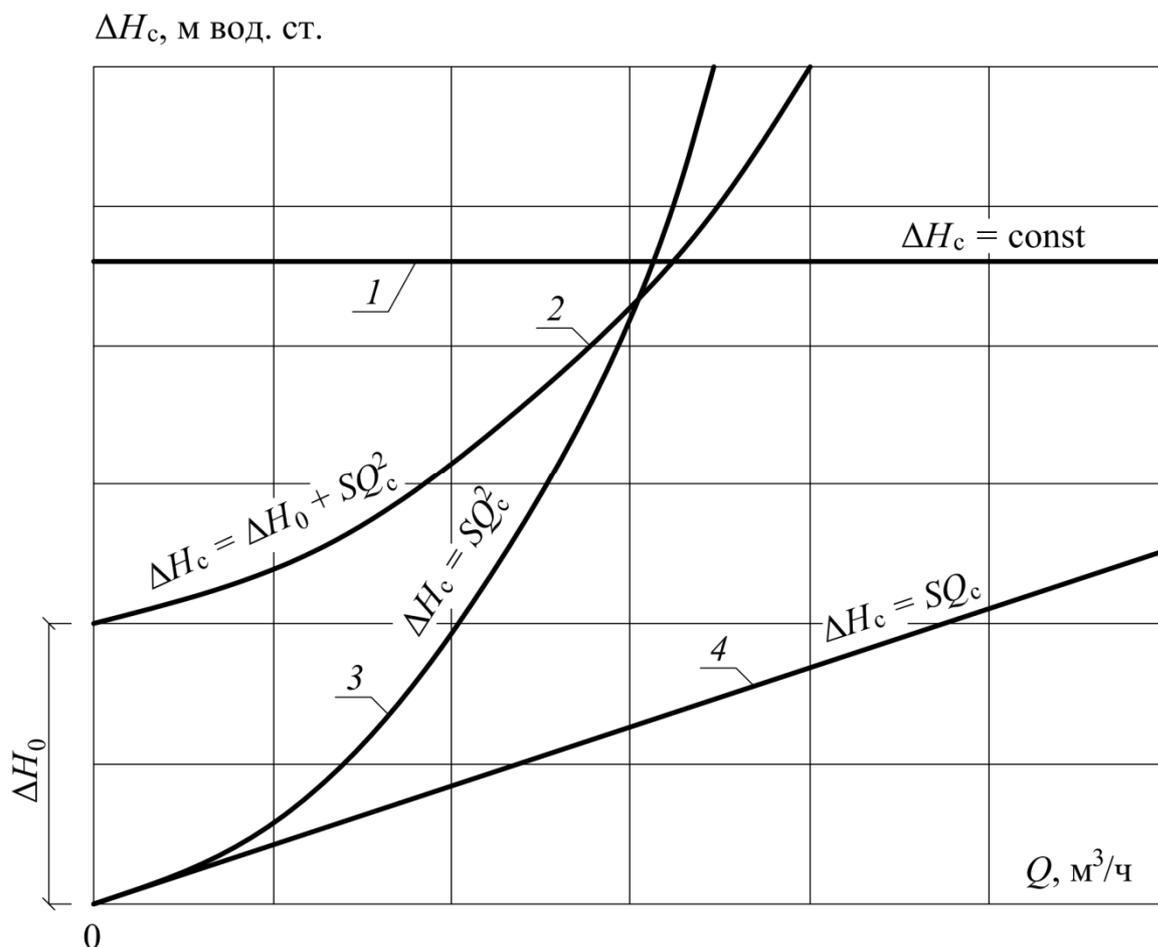


Рисунок 1.12 – Виды гидравлических характеристик трубопроводных сетей

### 1.3.2 Метод наложения характеристик

**Режимом работы насоса** в гидравлической сети называется равновесное состояние, определяемое совместным решением её характеристики и нагнетателя. Для определения этого состояния используется метод наложения характеристик, состоящий в том, что характеристики сети и насоса строятся графически в одних и тех же координатах и масштабе, после чего находится точка их пересечения, которая называется **рабочей точкой**.

Рабочая точка однозначно определяет напор (давление) и производительность нагнетателя при работе в конкретной гидравлической сети.

Например, полный напор (давление) насоса  $H_{vA}$  в рабочей точке А равен полному гидравлическому сопротивлению или полным потерям напора  $\Delta H_c$  в гидравлической сети, а производительность насоса  $Q_A$  равна расходу жидкости в рассматриваемой трубопроводной системе  $Q_c$  (рис. 1.13).

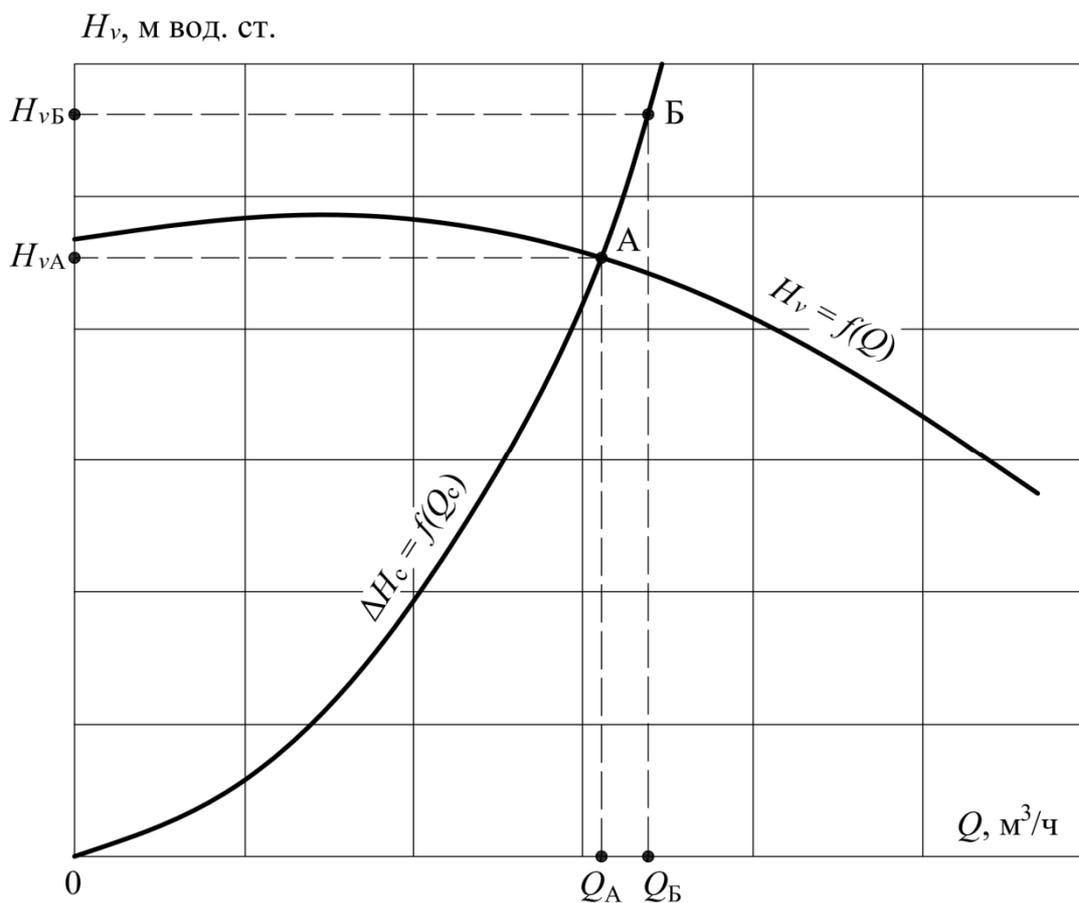


Рисунок 1.13 – Определение режима работы насоса в гидравлической сети

Насос с характеристикой  $H_v = f(Q)$ , работая в сети с гидравлической характеристикой  $\Delta H_c = f(Q_c)$ , не может иметь производительность, большую, чем  $Q_A$ , так как при  $Q_B > Q_A$  полный напор, создаваемый насосом  $H_{vA}$ , меньше потерь давления в сети  $\Delta H_c$ . То есть, для перемещения среды в количестве  $Q_B$  необходимо создать напор нагнетателя в размере  $H_{vB}$ , что возможно только в том случае, если характеристика насоса  $H_v = f(Q)$  будет проходить через требуемую точку Б на характеристике сети  $\Delta H_c = f(Q_c)$ . Производительность, меньшая величины  $Q_A$ , может быть обеспечена насосом лишь в случае изменения его характеристики с помощью того или иного способа регулирования.

Если характеристику сети  $\Delta H_c = f(Q_c)$  наложить на полную характеристику нагнетателя  $H_v = f(Q)$  и провести через рабочую точку А вертикальную линию, то в точках пересечения ее с характеристиками мощности  $N = f(Q)$ , коэффициента полезного действия  $\eta = f(Q)$ , а также статического и динамического напоров  $H_s = f(Q)$  и  $H_d = f(Q)$  получим численные значения данных параметров (рис. 1.14).

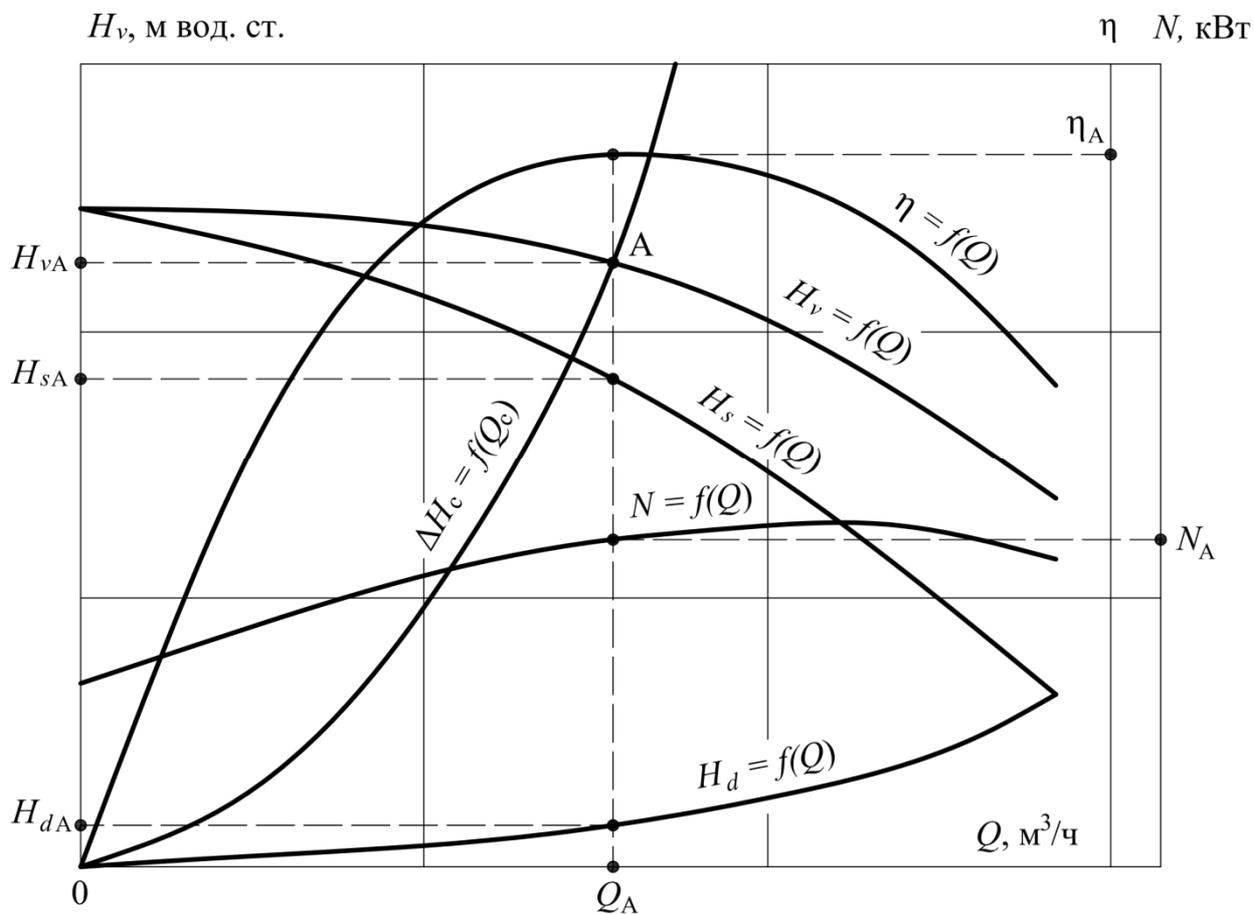


Рисунок 1.14 – Определение параметров работы насоса в гидравлической сети

Помимо простоты и наглядности метод наложения характеристик зачастую оказывается единственным возможным методом, позволяющим проанализировать работу не только одного, но и нескольких нагнетателей, работающих в гидравлических сетях различной сложности.

### 1.3.3 Параллельная работа насосов в сети

Параллельное включение двух и большего числа насосов применяется для увеличения суммарной производительности системы, когда соответствующее увеличение частоты вращения рабочего колеса или размеров насоса невозможно из-за чрезмерного повышения уровня шума, конструктивных или архитектурно-планировочных решений (рис. 1.15).

В данном случае кривые с индексами 1 и 2 представляют собой характеристики двух одинаковых насосов, а кривая с индексом 3 описывает совместную характеристику двух параллельно соединенных нагнетателей.

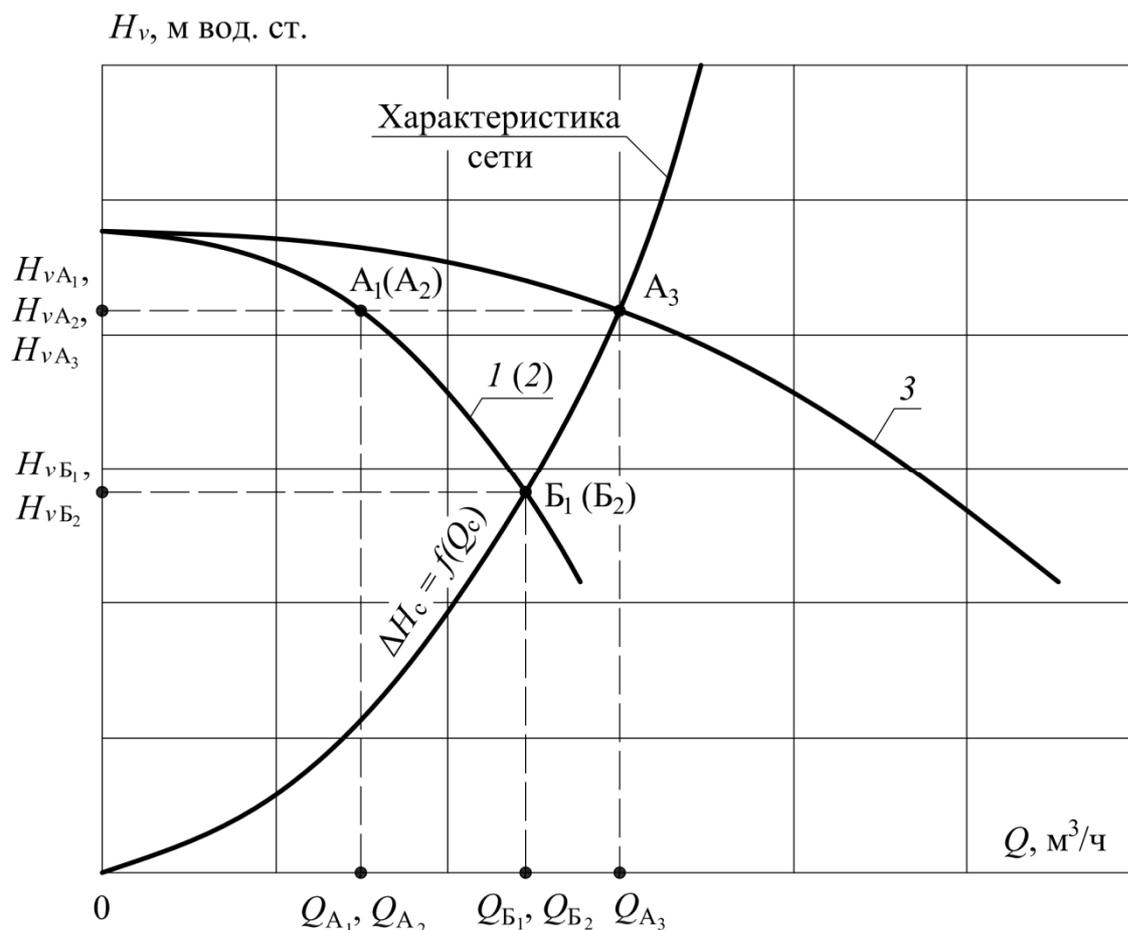


Рисунок 1.15 – Параллельная работа двух одинаковых насосов в сети

Чтобы получить суммарную характеристику двух параллельно работающих нагнетателей, необходимо сложить их производительности при одинаковом давлении. При включении двух одинаковых гидравлических машин в общую сеть совместный режим работы будет определяться рабочей точкой  $A_3$ .

Суммарная производительность системы  $Q_{A_3}$ , м³/ч, составит

$$Q_{A_3} = Q_{A_1} + Q_{A_2}, \quad (1.3)$$

где  $Q_{A_1}$ ,  $Q_{A_2}$  – производительности первого и второго насосов, м³/ч.

Суммарный напор  $H_{v3}$ , м вод. ст., определяется по выражению:

$$H_{v3} = H_{v1} = H_{v2}, \quad (1.4)$$

где  $H_{A_1}$ ,  $H_{A_2}$  – напоры первого и второго насосов, м вод. ст.

Суммарная мощность  $N_{A_3}$ , Вт, равна

$$N_{A_3} = N_{A_1} + N_{A_2}, \quad (1.5)$$

где  $N_{A_1}$ ,  $N_{A_2}$  – мощности первого и второго насосов, Вт.

Рабочая точка каждого насоса по отдельности, одновременно работающего на сеть, будет определяться точкой  $A_1$  ( $A_2$ ).

Если предположить, что один из двух насосов был отключен, демонтирован или вышел из строя, то производительность второго нагнетателя  $Q_{B_1}$  ( $Q_{B_2}$ ) будет несколько больше, чем при их параллельном соединении  $Q_{A_1}$  ( $Q_{A_2}$ ).

Работа станет менее экономичной, напор также изменится в меньшую сторону  $H_{vB_1}$  ( $H_{vB_2}$ ), чем при параллельной работе  $H_{vA_1}$  ( $H_{vA_2}$ ). Параметры одного из нагнетателей в данном случае, работающего на ту же самую сеть, что и при параллельном соединении, будут определяться рабочей точкой  $B_1$  ( $B_2$ ).

Параллельная работа насосов эффективна при пологой характеристике сети, при крутой характеристике сети – параллельное подключение второго нагнетателя будет практически неэффективно и их совместная производительность станет мало отличаться от производительности при работе одного насоса.

Построение суммарной характеристики насосов с разными характеристиками выполняется аналогично. Дополнительно следует учитывать, что при сильно отличающихся характеристиках насосов возможна отрицательная производительность нагнетателя с меньшим развиваемым давлением (напором), то есть движение жидкости через него в обратном направлении (рис. 1.16).

Направление вращения рабочего колеса при этом не изменяется, а насос потребляет некоторую подведенную мощность. На рис. 1.16 кривые с индексами 1 и 2 представляют собой характеристики двух различных насосов.

Кривая с индексом 3 изображает совместную характеристику двух параллельно соединенных нагнетателей, имеющих различные характеристики.

Суммарная производительность гидравлической системы  $Q_{A_3}$  в этом случае будет меньше производительности одного насоса  $Q_{B_2}$  с большим развиваемым напором  $H_{vB_2} > H_{vBA_3}$ , но больше производительности  $Q_{B_1}$  другого насоса, имеющего меньший развиваемый напор  $H_{vB_1} < H_{vA_3}$ .

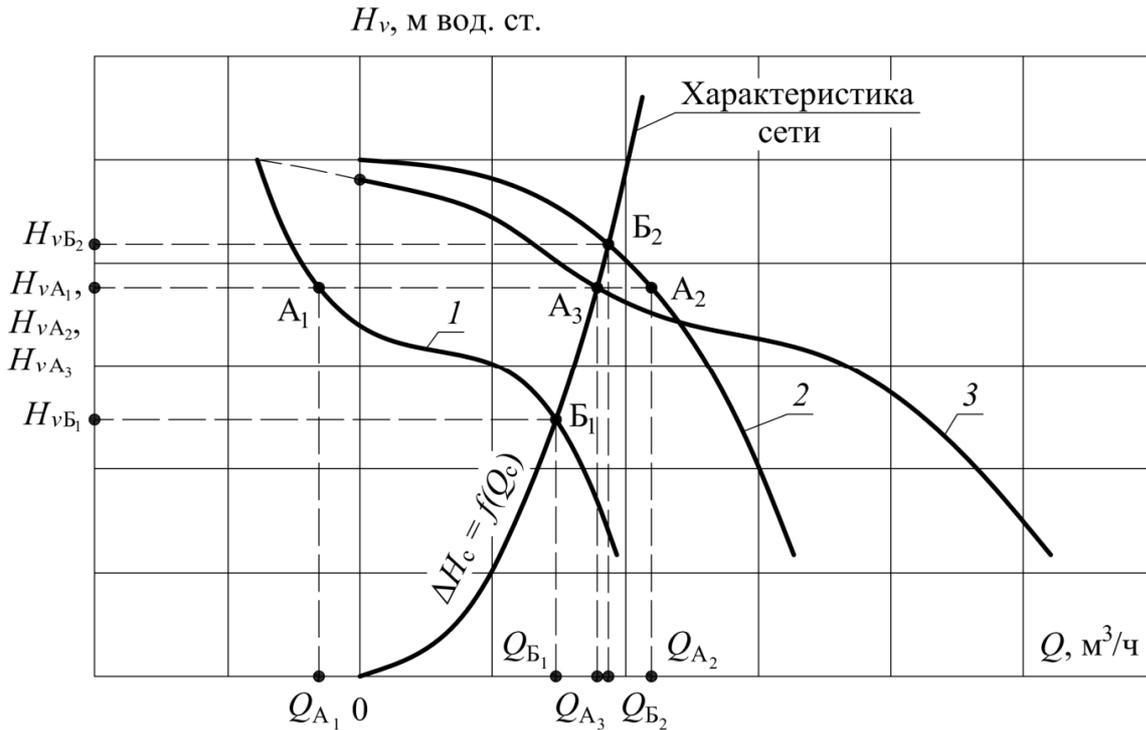


Рисунок 1.16 – Параллельная работа двух различных насосов в гидравлической сети

### 1.3.4 Последовательная работа насосов в сети

Последовательное включение двух или большего числа насосов применяется в том случае, если напора (давления), создаваемого одним нагнетателем, недостаточно для преодоления сопротивления сети.

При последовательном включении одно и то же количество жидкости перемещается всеми нагнетателями и давление (напор), необходимое для преодоления сопротивления всей сети, равно сумме давлений, создаваемых каждым насосом по отдельности. Для построения суммарной характеристики напора двух одинаковых насосов необходимо при любом значении производительности суммировать значения соответствующего ей напора (рис. 1.17).

Режим работы такой системы определяет точка пересечения суммарной характеристики насосов с характеристикой сети (рабочая точка  $A_3$ ). Насосы при этом развивают давление  $H_{vA_3}$ , обеспечивая производительность  $Q_{A_3}$ .

При отключении одного из насосов он будет представлять дополнительное сопротивление для второго работающего и характеристика гидравлической сети пойдет круче. В этом случае давление резко снизится, но будет больше

давления  $H_{vA_1}$  ( $H_{vA_2}$ ), которое развивал каждый из нагнетателей при совместной работе, производительность уменьшится, потребляемая мощность также снизится, но перегрузки электродвигателя не будет.

Подключение насосов, имеющих разные характеристиками, может привести к ситуации, когда насос меньшей мощности включается с более мощным.

В таком случае его производительность может увеличиться до значений гораздо больших, чем его собственная максимальная производительность и он станет дополнительным сопротивлением для мощного насоса. Общее давление снизится по сравнению с тем, что создает при индивидуальной работе в той же сети более мощный насос (рис. 1.18).

Целесообразнее использовать нагнетатели с одинаковой характеристикой. Число последовательно включенных насосов может быть любым и определяется значением необходимого развиваемого давления.

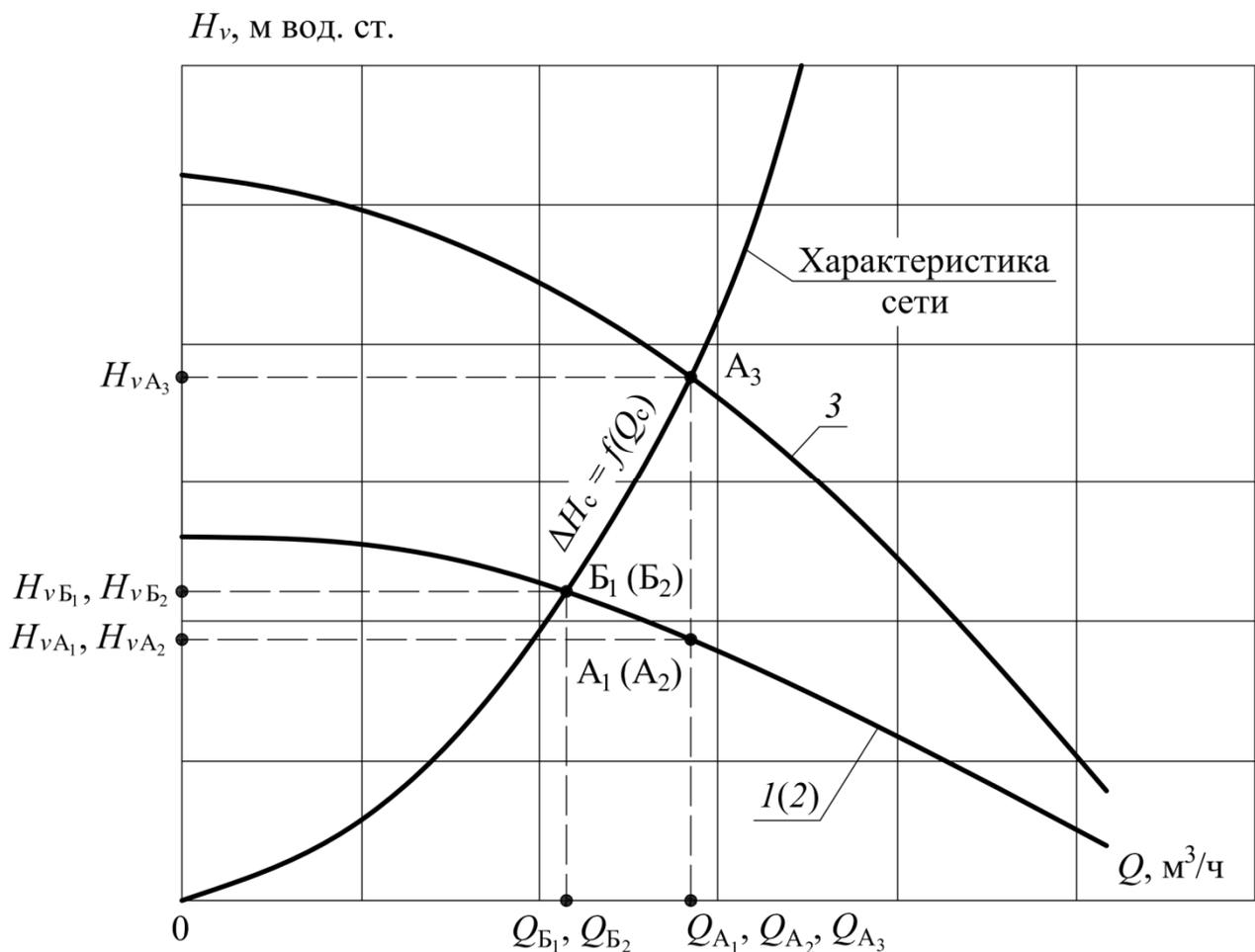


Рисунок 1.17 – Последовательная работа двух одинаковых насосов в сети

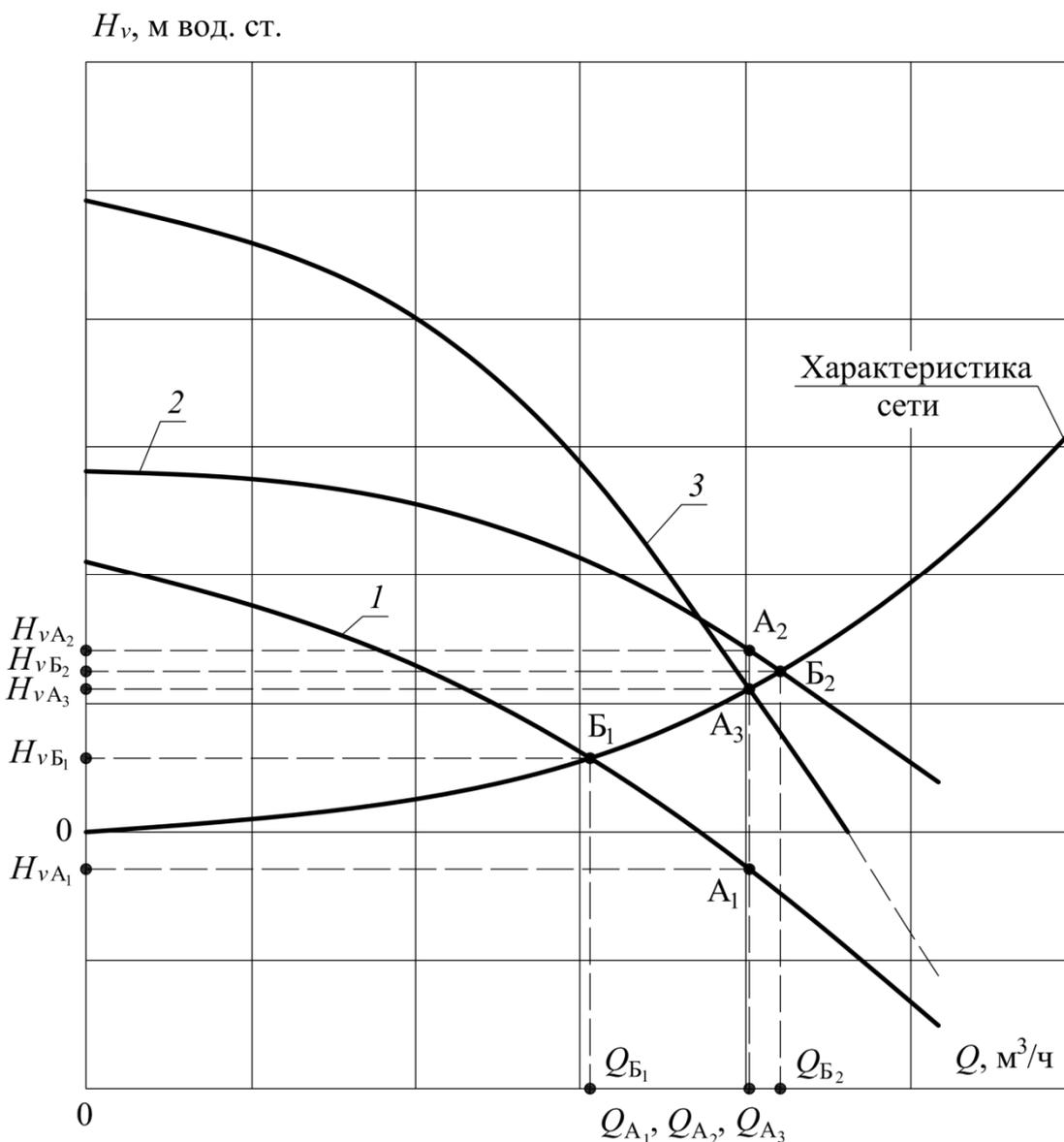


Рисунок 1.18 – Последовательная работа двух различных насосов в сети

Более подробно основные характеристики и режимы работы насосов в гидравлической сети описаны в справочной литературе [2...5, 7, 9].

#### 1.4 Контрольные вопросы для самостоятельной работы

1. Перечислите основные элементы лабораторной установки и их назначение. Опишите режимы регулирования числа оборотов центробежных насосов.
2. Приведите графическую интерпретацию гидравлической характеристики сети, напорно-расходной характеристики насоса и его рабочей точки.
3. Представьте основные аналитические и графические зависимости работы насосов в последовательном и параллельном режимах работы.

4. Опишите основных видов гидравлических характеристик сети, приведите их функциональные зависимости.
5. Дайте определение рабочей точке гидравлической системы, какое её состояние она характеризует?
6. В чём отличия схем параллельного соединения одинаковых центробежных насосов от последовательного режима работы?
7. Приведите гидравлические характеристики двух одинаковых и различных насосов, соединённых в сети последовательно.
8. Почему предпочтительнее объединять в одну гидравлическую систему два одинаковых нагнетателя вместо организации совместной работы разных по характеристикам гидравлических машин?
9. Что такое характеристика гидравлического сопротивления сети, в чём заключается её физический смысл? Приведите её единицу измерения.
10. Как определяется суммарная мощность двух одинаковых циркуляционных насосов, работающих в сети параллельно?
11. Для чего используется метод наложения характеристик в гидравлике? В чём состоит основная суть данного метода?

## 2 ПРАКТИКУМ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ НАСОСОВ

### 2.1 Лабораторная работа № 1. Построение графических характеристик циркуляционного насоса

**Цель работы** заключается в построении основных графических характеристик центробежного насоса  $H = f(Q)$ ,  $N_{эл} = f(Q)$  и  $\eta = f(Q)$ , полученных в результате обработки лабораторных измерений.

**Порядок выполнения работы**, схема проведения которой приведена на рисунке 2.1, должен соответствовать указаниям производителя [10].

1. Необходимо закрыть шаровые краны I для отключения первого циркуляционного насоса IV от гидравлического контура, а краны II – открыть. Балансировочный клапан III перевести в полностью открытое положение. Циркуляционный насос IV при этом выключить.

2. Проводится запуск второго циркуляционного насоса V при максимальном числе оборотов его рабочего колеса.

3. Снимаются следующие показания:

- объёмный расход воды  $Q$ , м<sup>3</sup>/ч, с помощью расходомера VI;
- избыточное давление до циркуляционного насоса  $p_1$ , Па, с манометра VII;
- избыточное давление после циркуляционного насоса  $p_2$ , Па, с манометра VIII;
- потребляемая насосом из сети электрическая мощность  $N_{эл}$ , Вт, с ваттметра IX.

4. Результаты измерений заносятся в таблицу 2.1.

5. Определяется полезная мощность насоса  $N_{пол}$ , Вт, по формуле:

$$N_{пол} = \frac{\rho g Q H}{3600}, \quad (2.1)$$

где  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>,  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>; 3600 – переводной коэффициент из часов в секунды;  $H$  – напор циркуляционного насоса, м вод. ст., рассчитываемый по зависимости

$$H = (p_2 - p_1) g \rho. \quad (2.2)$$

6. Находят коэффициент полезного действия насоса  $\eta$ , доля, равный

$$\eta = N_{пол} / N_{эл}. \quad (2.3)$$

7. Повторяют измерения постепенно уменьшая расход воды проходящий через балансировочный клапан путём изменения его настройки (не менее 8 раз).

8. Результаты расчётов заносятся в таблицу 2.1. По данным таблицы строятся графические характеристики насоса  $H = f(Q)$ ,  $N_{эл} = f(Q)$  и  $\eta = f(Q)$ . Полученные результаты сопоставляются с приведёнными на рисунке 1.6.

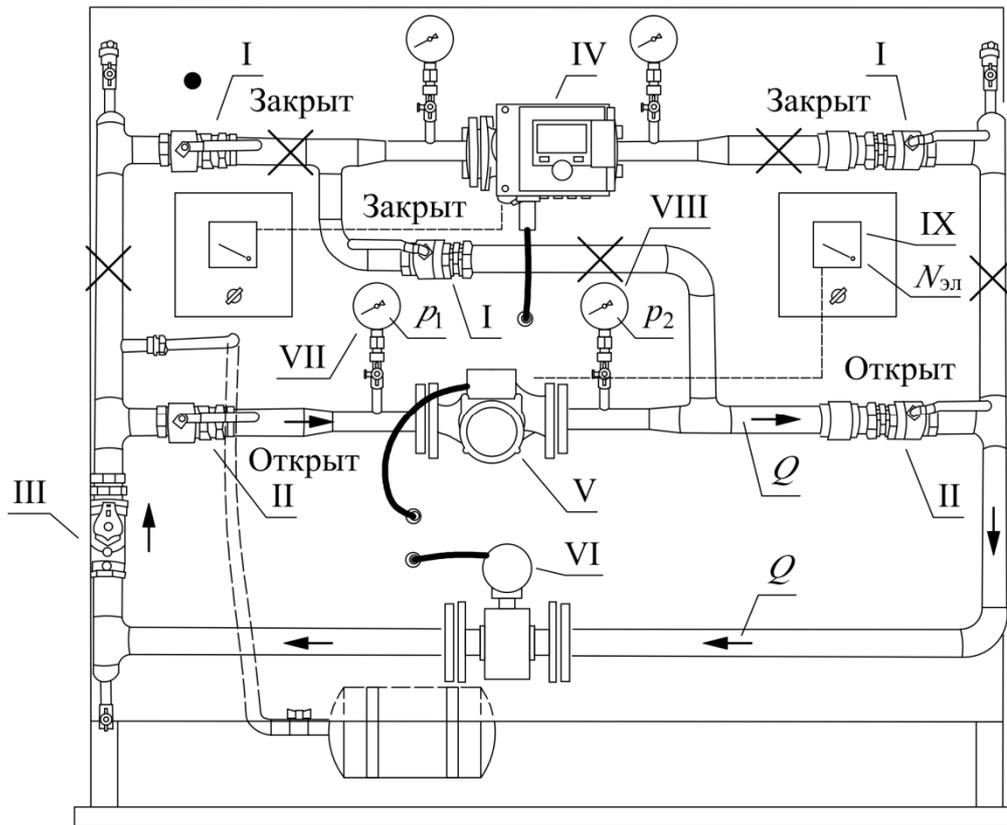


Рисунок 2.1 – Схема проведения лабораторной работы № 1

Таблица 2.1 – Опытные и расчётные данные лабораторной работы № 1

Наименование и обозначение, ед. изм	Настройка балансировочного клапана							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Давление на всасывании $p_1$ , Па								
Давление на нагнетании $p_2$ , Па								
Напор насоса $H$ , м вод. ст.								
Объёмный расход воды $Q$ , м <sup>3</sup> /ч								
Полезная мощность $N_{пол}$ , Вт								
Потребляемая мощность $N_{эл}$ , Вт								
Коэффициент полезного действия $\eta$ , доля								

## 2.2 Лабораторная работа № 2. Построение характеристики сети

**Цель работы** состоит в изучении методики построения характеристики сети  $\Delta p_{\text{сети}} = f(Q)$ , обслуживаемой циркуляционным насосом.

**Порядок выполнения работы**, схема проведения которой приведена на рисунке 2.2, должен соответствовать указаниям производителя [10].

1. Необходимо закрыть шаровые краны I для отключения второго циркуляционных насосов IV от гидравлического контура, а краны II – открыть. Балансировочный клапан III перевести в полностью открытое положение. Циркуляционный насос IV при этом выключить.

2. Проводится запуск второго циркуляционного насос V при максимальном числе оборотов его рабочего колеса.

3. Снимаются следующие показания:

- объёмный расход воды  $Q$ , м<sup>3</sup>/ч, с помощью расходомера VI;
- избыточное давление до циркуляционного насоса  $p_1$ , Па, с манометра VII;
- избыточное давление после циркуляционного насоса  $p_2$ , Па, с манометра VIII.

4. Измерения  $Q$ ,  $p_1$  и  $p_2$  проводятся не менее 8 раз при разном числе оборотов циркуляционного насоса в диапазоне от 450...3600 об/мин.

5. Результаты измерений заносятся в таблицу 2.1.

6. Вычисляются потери давления в сети  $\Delta p_{\text{сети}}$ , Па, по формуле:

$$\Delta p_{\text{сети}} = p_2 - p_1. \quad (2.4)$$

7. Находятся значения характеристик сопротивления сети для каждого  $i$ -го измерения  $S_i$ , Па/(м<sup>3</sup>/ч)<sup>2</sup>, равные

$$S_i = \frac{\Delta p_{\text{сети}i}}{Q_i^2}, \quad (2.5)$$

где  $\Delta p_{\text{сети}i}$  – потери давления при  $i$ -м измерении, Па;  $Q_i$  – расход воды, проходящий через сеть, при  $i$ -м измерении, м<sup>3</sup>/ч.

8. Определяется среднее значение характеристики сопротивления исследуемой сети  $S_{\text{ср}}$ , Па/(м<sup>3</sup>/ч)<sup>2</sup>, равное

$$S_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1...n} S_i}{n}, \quad (2.6)$$

где  $n$  – суммарное количество измерений, шт.

9. Измерения проводятся двумя сериями при малом и большом значениях характеристики сопротивления сети  $S_{cp1}$  и  $S_{cp2}$ , Па/(м<sup>3</sup>/ч)<sup>2</sup>. Значение  $S_{cp1}$  устанавливается при полном открытии балансировочного клапана, а  $S_{cp2}$  при некотором изменении его настройки (частичном закрытии), после чего приведённые в пунктах 2...8 действия повторяются. Результаты расчётов заносятся в таблицу 2.2.

10. Для сетей с малым и большим значениями характеристик сопротивления строятся характеристики сети  $\Delta p_{сети1} = f(Q)$  и  $\Delta p_{сети2} = f(Q)$ .

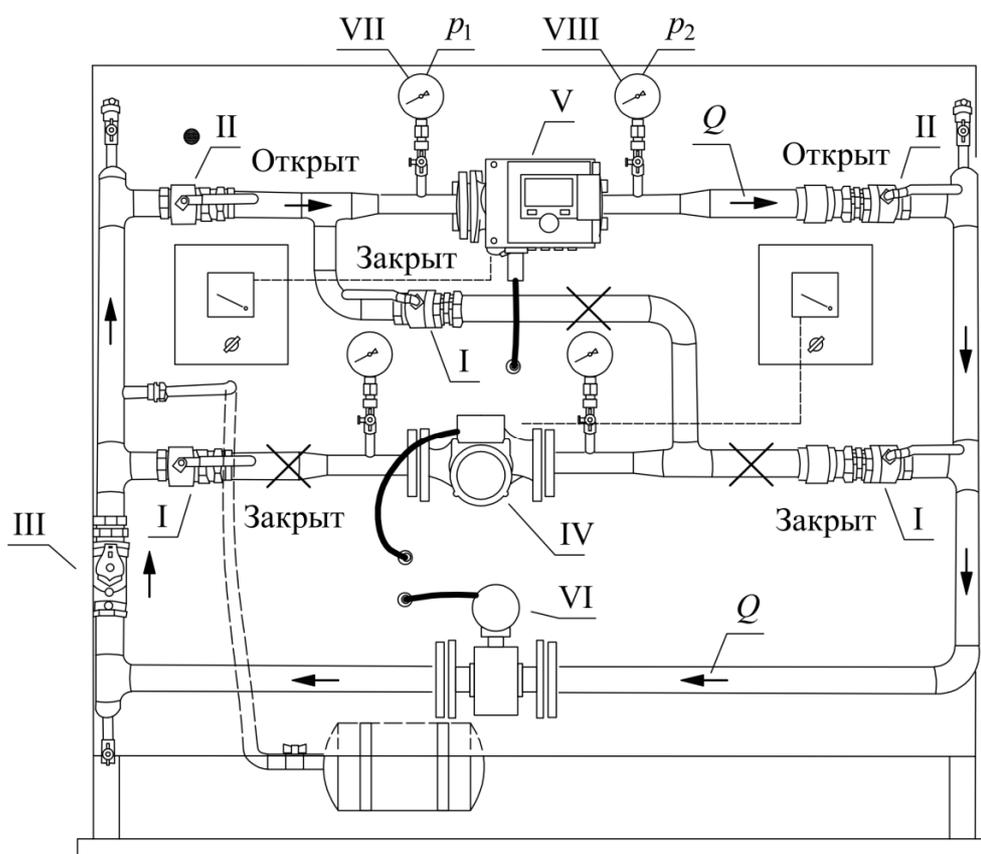


Рисунок 2.2 – Схема проведения лабораторной работы № 2

Таблица 2.2 – Опытные и расчётные данные лабораторной работы № 2

Наименование и обозначение, ед. изм.	Серия измерений															
	при открытом балансировочном клапане								при частично закрытом балансировочном клапане							
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
Давление на всасывании $p_1$ , Па																
Давление на нагнетании $p_2$ , Па																
Потери давления в сети $\Delta p_{сети}$ , Па																
Объёмный расход воды $Q$ , м <sup>3</sup> /ч																
Характеристика сопротивления сети $S_i$ , Па/(м <sup>3</sup> /ч) <sup>2</sup>																
Средние значения характеристики сопротивления сети $S_{cp}$ , Па/(м <sup>3</sup> /ч) <sup>2</sup>	$S_{cp1}$								$S_{cp2}$							

### 2.3 Лабораторная работа № 3. Определение зависимостей графических характеристик насоса от частоты вращения его рабочего колеса

**Цель работы** заключается в построении основных графических характеристик центробежного насоса  $H = f(Q)$ ,  $N_{эл} = f(Q)$  и  $\eta = f(Q)$ , полученных в результате обработки результатов лабораторных измерений, при различной частоте оборотов его рабочего колеса.

**Порядок выполнения работы**, схема проведения которой приведена на рисунке 2.3, должен соответствовать указаниям производителя [10].

1. Необходимо закрыть шаровые краны I для отключения второго циркуляционных насосов IV от гидравлического контура, а краны II – открыть. Балансировочный клапан III перевести в полностью открытое положение. Циркуляционный насос IV при этом выключить.

2. Проводится запуск первого циркуляционного насоса V при числе оборотов его рабочего колеса  $n_1 = 2820$  об/мин.

3. Снимаются следующие показания:

- объёмный расход воды  $Q_1$ , м<sup>3</sup>/ч, с помощью расходомера VI;
- избыточное давление до циркуляционного насоса  $p_{1.1}$ , Па, с манометра VII;
- избыточное давление после циркуляционного насоса  $p_{2.1}$ , Па, с манометра VIII;
- потребляемая насосом из сети электрическая мощность  $N_{эл.1}$ , Вт, с ваттметра IX.

4. По формулам (2.1)...(2.3) находят значения  $N_{пол.1}$ ,  $H_1$  и  $\eta_1$ .

5. Проводят измерения постепенно уменьшая расход воды проходящий через балансировочный клапан путём изменения его настройки (не менее 8 раз).

6. Пункты 2...5 повторяют при меньшем числе оборотов рабочего колеса, например при  $n_2 = 2430$  об/мин, в результате получаем  $p_{1.2}$ ,  $p_{2.2}$ ,  $N_{пол.2}$ ,  $H_2$  и  $\eta_2$ .

7. Строятся графические характеристики центробежного насоса  $H_1 = f(Q)$ ,  $N_{эл.1} = f(Q)$  и  $\eta_1 = f(Q)$  при частоте оборотов рабочего колеса  $n_1$ , а также характеристики  $H_2 = f(Q)$ ,  $N_{эл.2} = f(Q)$  и  $\eta_2 = f(Q)$  при  $n_2$ .

8. Для графических характеристик при  $n_1$  проводится аналитический перерасчёт теоретических значений  $H_2$ ,  $N_{эл.2}$  и  $Q_2$  на  $n_2$  и строятся дополнительные графики  $H_{2.теор} = f(Q)$ ,  $N_{эл.2.теор} = f(Q)$  и  $\eta_{2.теор} = f(Q)$  при  $n_2$  по зависимостям:

$$H_{2.теор} = H_1 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2; \quad (2.7)$$

$$N_{эл.2.теор} = N_{эл.1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^3; \quad (2.8)$$

$$Q_{2.теор} = Q_1 \frac{n_2}{n_1}; \quad (2.9)$$

$$N_{пол.2.теор} = \frac{\rho g Q_{2.теор} H_{2.теор}}{3600}; \quad (2.10)$$

$$\eta_{2.теор} = N_{пол.2} / N_{эл.2}. \quad (2.11)$$

9. Теоретические  $H_{2.теор} = f(Q)$ ,  $N_{эл.2.теор} = f(Q)$  и  $\eta_{2.теор} = f(Q)$  и экспериментально полученные  $H_2 = f(Q)$ ,  $N_{эл.2} = f(Q)$  и  $\eta_2 = f(Q)$  графические характеристики сопоставляются друг с другом.

10. Результаты расчётов заносятся в таблицу 2.3.

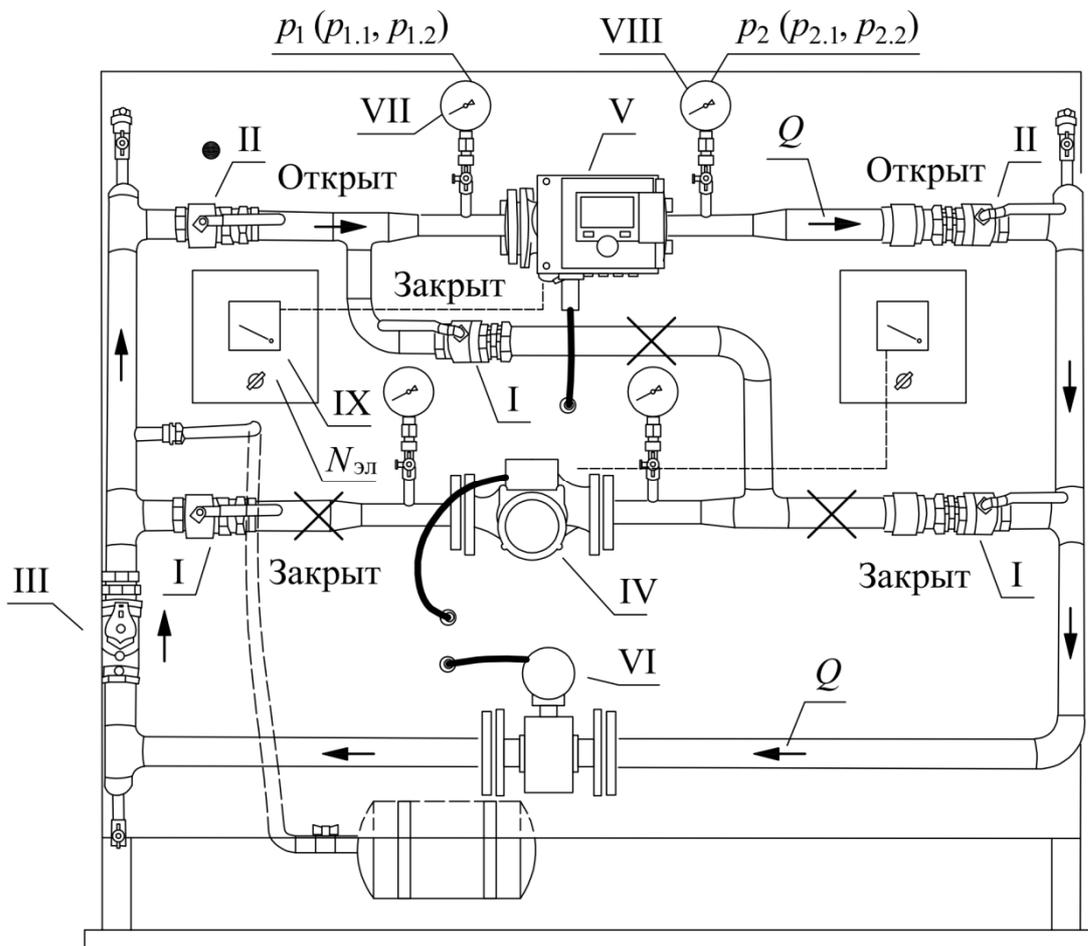


Рисунок 2.3 – Схема проведения лабораторной работы № 3

Таблица 2.3 – Опытные и расчётные данные лабораторной работы № 3

Наименование и обозначение, ед. изм	Настройка балансировочного клапана							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Результаты расчётов и измерений рабочих характеристик при $n_1$								
Давление на всасывании $p_{1.1}$ , Па								
Давление на нагнетании $p_{2.1}$ , Па								
Напор насоса $H_1$ , м вод. ст.								
Объёмный расход воды $Q_1$ , м <sup>3</sup> /ч								
Полезная мощность $N_{пол.1}$ , Вт								
Потребляемая мощность $N_{эл.1}$ , Вт								
Коэффициент полезного действия $\eta_1$ , доля								
Результаты расчётов и измерений рабочих характеристик при $n_2$								
Давление на всасывании $p_{1.2}$ , Па								
Давление на нагнетании $p_{2.2}$ , Па								
Напор насоса $H_2$ , м вод. ст.								
Объёмный расход воды $Q_2$ , м <sup>3</sup> /ч								
Полезная мощность $N_{пол.2}$ , Вт								
Потребляемая мощность $N_{эл.2}$ , Вт								
Коэффициент полезного действия $\eta_2$ , доля								
Теоретические значения характеристик при $n_2$								
Напор насоса $H_{2.теор}$ , м вод. ст.								
Объёмный расход воды $Q_{2.теор}$ , м <sup>3</sup> /ч								
Полезная мощность $N_{пол.2.теор}$ , Вт								
Потребляемая мощность $N_{эл.2.теор}$ , Вт								
Коэффициент полезного действия $\eta_{2.теор}$ , ДОЛЯ								

#### 2.4 Лабораторная работа № 4. Изучение совместной работы последовательно соединённых насосов с одинаковыми характеристиками

**Цель работы** заключается в исследовании суммарной характеристики двух последовательно соединённых насосов, имеющих одинаковые характеристики.

**Порядок выполнения работы**, схема проведения которой приведена на рисунке 2.4, должен соответствовать указаниям производителя [10].

1. Необходимо закрыть шаровые краны III, IV и V, одновременно открыв краны I и II. Балансировочный клапан XIII перевести в полностью открытое положение. Циркуляционный насос VII при этом выключить.

2. Запустить первый циркуляционный насос при числе оборотов его рабочего колеса  $n = 3070$  об/мин.

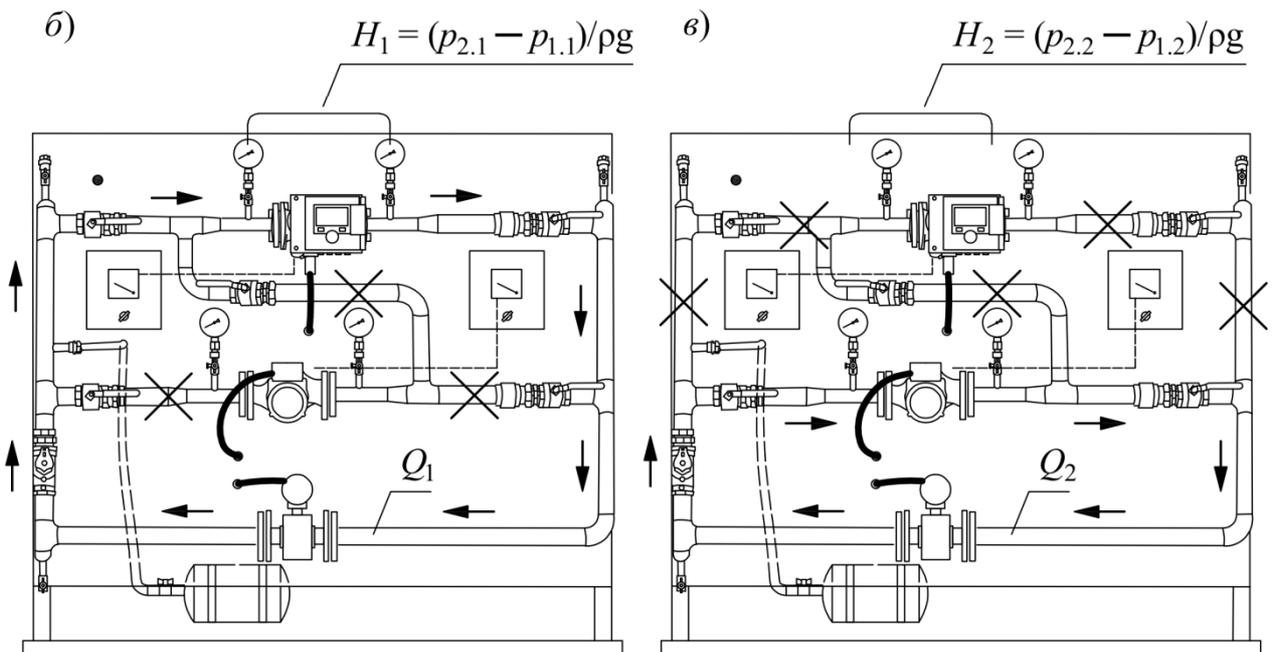
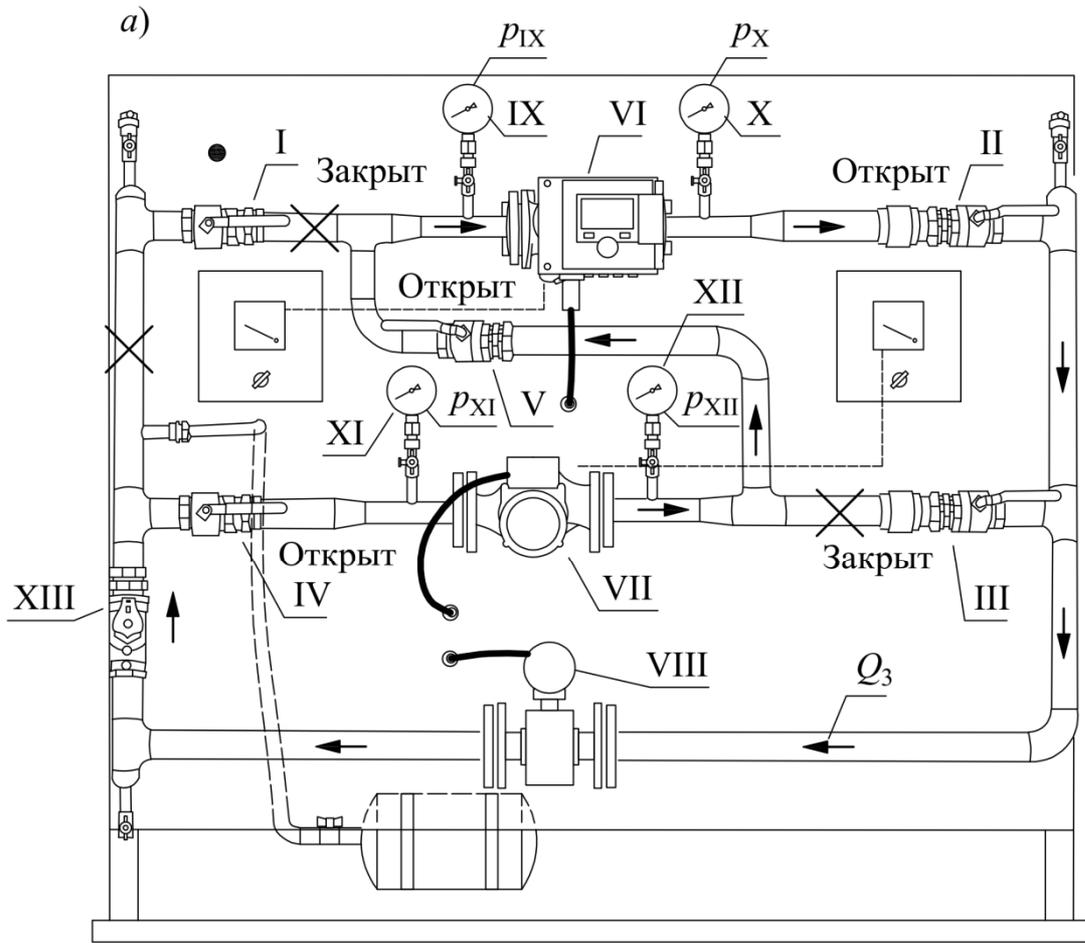


Рисунок 2.4 – Схема проведения лабораторной работы № 4: а – совместная работа двух последовательно установленных насосов; б – включен только первый насос; в – то же, только второй

3. Снимаются следующие показания:

- объёмный расход воды  $Q_1$ , м<sup>3</sup>/ч, с помощью расходомера VIII;
- избыточное давление до циркуляционного насоса  $p_{1.1}$ , Па, с манометра X;
- избыточное давление после циркуляционного насоса  $p_{2.1}$ , Па, с манометра IX.

4. По формуле (2.2) определяется напор насоса  $H$ , м.

5. Повторяют измерения постепенно уменьшая расход воды проходящий через балансировочный клапан путём изменения его настройки (не менее 8 раз).

6. Результаты измерений и расчётов заносят в таблицу 2.4.

7. Необходимо закрыть шаровые краны I, II и V, одновременно открыв краны III и IV. Балансировочный клапан XIII перевести в полностью открытое положение. Циркуляционный насос VI при этом выключить.

8. Запустить второй циркуляционный насос при максимальном числе его оборотов, в этом случае его графическая характеристика  $H = f(Q)$  должна полностью совпадать с аналогичной характеристикой первого насоса.

9. Пункты 3...6 повторяют, при этом показания избыточных давлений до и после второго циркуляционного насоса  $p_{2.1}$  и  $p_{2.2}$ , Па, определяют по манометрам XI и XII, а объёмный расход воды  $Q_2$ , м<sup>3</sup>/ч, аналогично по расходомеру VIII.

10. Для запуска двух последовательно работающих насосов требуется предварительно закрыть шаровые краны I, III и открыть краны II, IV и V.

11. Запустить первый насос VI при  $n = 3070$  об/мин и второй насос VII при максимальной частоте оборотов одновременно.

12. Снимаются следующие показания:

- объёмный расход воды  $Q_3$ , м<sup>3</sup>/ч, с помощью расходомера VIII;
- избыточное давление до первого насоса  $p_{IX}$ , Па, с манометра IX;
- избыточное давление после первого насоса  $p_X$ , Па, с манометра X;
- избыточное давление до второго насоса  $p_{XI}$ , Па, с манометра XI;
- избыточное давление после второго насоса  $p_{XII}$ , Па, с манометра XII.

13. Определяется суммарный напор  $H_3$ , м вод. ст., равный

$$H_3 = \frac{p_X - p_{XI}}{\rho g} + \frac{p_{XII} - (p_{IX} + \rho g Z)}{\rho g} + Z, \quad (2.12)$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $\text{кг/м}^3$ ,  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $Z$  – высота подъёма жидкости/ разницы между отметками манометров,  $\text{м}$ ,  $Z = 0,5 \text{ м}$ .

14. Повторяют измерения постепенно уменьшая расход воды проходящий через балансировочный клапан путём изменения его настройки (не менее 8 раз).

15. Полученные значения заносят в таблицу 2.4. Строится  $H_3 = f(Q_3)$ .

16. Наносится теоретическая напорная характеристика двух работающих последовательно насосов, значения подачи которых  $Q_{3,\text{теор}}$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$ , равны производительностям каждого из насосов по отдельности ( $Q_{3,\text{теор}} = Q_1 = Q_2$ ), а соответствующие им напоры  $H_3$ ,  $\text{м вод. ст.}$ , определяются по формуле:

$$H_{3,\text{теор}} = H_1 + H_2. \quad (2.13)$$

17. Расчёты сводятся в таблицу 2.4. В результате проводят сопоставление измеренной и теоретической напорной характеристик.

Таблица 2.4 – Опытные и расчётные данные лабораторной работы № 4

Наименование и обозначение, ед. изм	Настройка балансировочного клапана							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Результаты измерений рабочих характеристик первого насоса								
Давление на всасывании $p_{1.1}$ , Па								
Давление на нагнетании $p_{2.1}$ , Па								
Напор насоса $H_1$ , м вод. ст.								
Объёмный расход воды $Q_1$ , $\text{м}^3/\text{ч}$								
Результаты измерений рабочих характеристик второго насоса								
Давление на всасывании $p_{1.2}$ , Па								
Давление на нагнетании $p_{2.2}$ , Па								
Напор насоса $H_2$ , м вод. ст.								
Объёмный расход воды $Q_2$ , $\text{м}^3/\text{ч}$								
Результаты измерений рабочих характеристик последовательно работающих насосов								
Давление на всасывании до первого насоса $p_{\text{I}}$ , Па								
Давление на нагнетании после первого насоса $p_{\text{X}}$ , Па								
Давление на всасывании до второго насоса $p_{\text{II}}$ , Па								
Давление на нагнетании после второго насоса $p_{\text{XII}}$ , Па								
Суммарный напор $H_3$ , м вод. ст.								
Объёмный расход воды $Q_3$ , $\text{м}^3/\text{ч}$								
Результаты теоретически определённых рабочих характеристик последовательно работающих насосов								
Суммарный напор $H_{3,\text{теор}}$ , м вод. ст.								
Объёмный расход воды $Q_{3,\text{теор}}$ , $\text{м}^3/\text{ч}$								

## 2.5 Лабораторная работа № 5. Изучение совместной работы последовательно соединённых насосов с различными характеристиками

**Цель работы** заключается в исследовании суммарной характеристики двух последовательно соединённых насосов, имеющих различные характеристики.

**Порядок выполнения работы**, схема проведения которой приведена на рисунке 2.4, должен соответствовать указаниям производителя [10].

1-16. Те же, что и в лабораторной работе № 4, за исключением пунктов 3 и 11. Первый циркуляционный насос необходимо запускать при числе оборотов его рабочего колеса  $n = 1260$  об/мин. Схемы работы лабораторной установки при независимом включении первого и второго циркуляционных насосов представлены на рисунках 2.4, б и в, а последовательном – а.

17. Расчёты сводятся в таблицу 2.5. В результате проводят сопоставление измеренной и теоретической напорной характеристик.

Таблица 2.4 – Опытные и расчётные данные лабораторной работы № 5

Наименование и обозначение, ед. изм	Настройка балансировочного клапана							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Результаты измерений рабочих характеристик первого насоса								
Давление на всасывании $p_{1.1}$ , Па								
Давление на нагнетании $p_{2.1}$ , Па								
Напор насоса $H_1$ , м вод. ст.								
Объёмный расход воды $Q_1$ , м <sup>3</sup> /ч								
Результаты измерений рабочих характеристик второго насоса								
Давление на всасывании $p_{1.2}$ , Па								
Давление на нагнетании $p_{2.2}$ , Па								
Напор насоса $H_2$ , м вод. ст.								
Объёмный расход воды $Q_2$ , м <sup>3</sup> /ч								
Результаты измерений рабочих характеристик последовательно работающих насосов с различными характеристиками								
Давление на всасывании до первого насоса $p_{IX}$ , Па								
Давление на нагнетании после первого насоса $p_X$ , Па								
Давление на всасывании до второго насоса $p_{XI}$ , Па								
Давление на нагнетании после второго насоса $p_{XII}$ , Па								
Суммарный напор $H_3$ , м вод. ст.								
Объёмный расход воды $Q_3$ , м <sup>3</sup> /ч								
Результаты теоретически определённых рабочих характеристик последовательно работающих насосов с различными характеристиками								
Суммарный напор $H_{3,теор}$ , м вод. ст.								
Объёмный расход воды $Q_{3,теор}$ , м <sup>3</sup> /ч								

## 2.6 Лабораторная работа № 6. Изучение совместной работы параллельно соединённых насосов с одинаковыми характеристиками

**Цель работы** заключается в исследовании суммарной характеристики двух параллельно соединённых насосов, имеющих одинаковые характеристики.

**Порядок выполнения работы**, схема проведения которой приведена на рисунке 2.5, должен соответствовать указаниям производителя [10].

1-9. Те же, что и в лабораторной работе №4. Схемы работы лабораторной установки при независимом включении первого и второго циркуляционных насосов представлены на рисунках 2.4, б и в.

10. Для запуска двух параллельно работающих насосов требуется предварительно закрыть шаровой кран V и открыть краны I...IV (рис. 2.5).

11. Запустить первый насос VI при  $n = 3070$  об/мин и второй насос VII максимальной частоте оборотов одновременно.

12. Снимаются следующие показания:

- объёмный расход воды  $Q_3$ , м<sup>3</sup>/ч, с помощью расходомера VIII;
- избыточное давление до насосов  $p_{XI}$ , Па, с манометра XI;
- избыточное давление после насосов  $p_{XII}$ , Па, с манометра XII.

13. Определяется суммарный напор  $H_3$ , м, равный:

$$H_3 = \frac{P_{XII} - P_{XI}}{9810}. \quad (2.14)$$

14. Повторяют пункты 12...13 постепенно уменьшая расход воды через балансировочный клапан путём изменения его настройки (всего не менее 8 раз).

15. Строится экспериментальная напорная характеристика  $H_3 = f(Q_3)$ , вместе с которой вычерчивается теоретическая характеристика  $H_{3,теор} = f(Q_{3,теор})$ , объёмные расходы  $Q_{3,теор}$ , м<sup>3</sup>/ч, и напоры  $H_{3,теор}$ , м вод. ст., при этом равны

$$H_{3,теор} = H_1 = H_2, \quad (2.15)$$

$$Q_{3,теор} = Q_1 + Q_2. \quad (2.16)$$

16. Расчёты сводятся в таблицу 2.6. В результате проводят сопоставление измеренной и теоретической напорной характеристик.

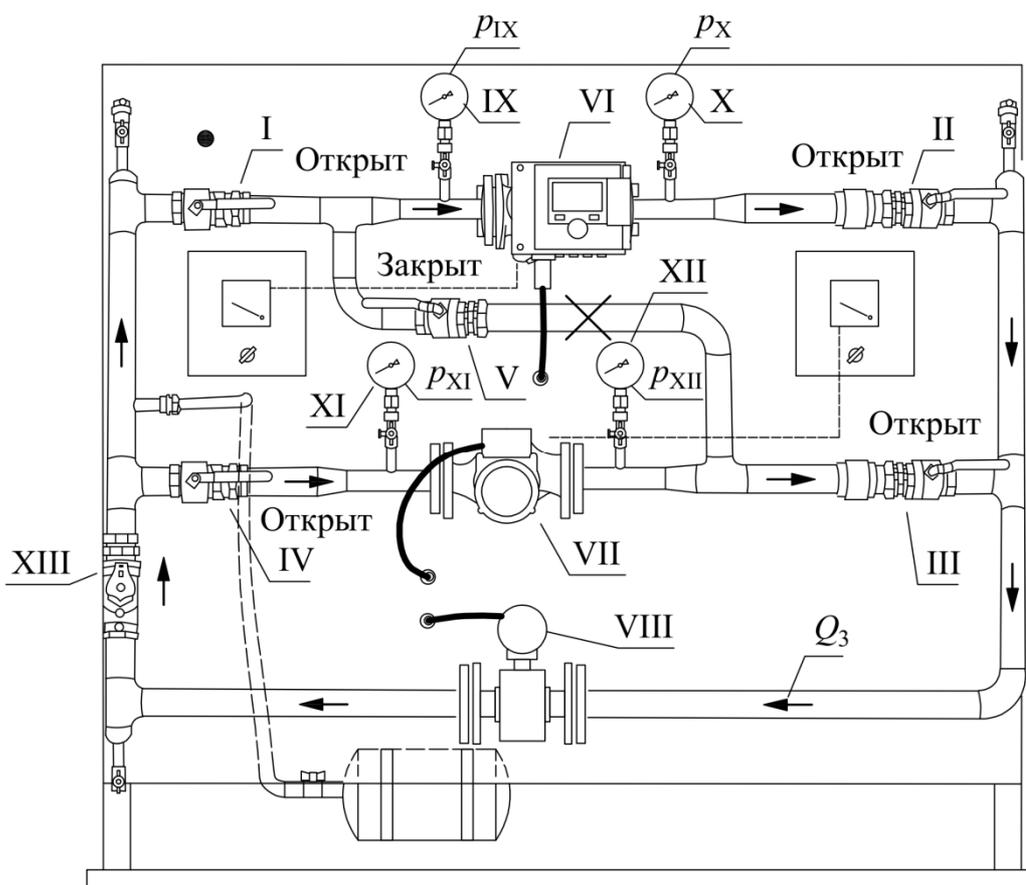


Рисунок 2.5 – Схема проведения лабораторной работы № 6

Таблица 2.6 – Опытные и расчётные данные лабораторной работы № 6

Наименование и обозначение, ед. изм	Настройка балансировочного клапана							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Результаты измерений рабочих характеристик первого насоса								
Давление на всасывании $p_{1.1}$ , Па								
Давление на нагнетании $p_{2.1}$ , Па								
Напор насоса $H_1$ , м вод. ст.								
Объёмный расход воды $Q_1$ , м <sup>3</sup> /ч								
Результаты измерений рабочих характеристик второго насоса								
Давление на всасывании $p_{1.2}$ , Па								
Давление на нагнетании $p_{2.2}$ , Па								
Напор насоса $H_2$ , м вод. ст.								
Объёмный расход воды $Q_2$ , м <sup>3</sup> /ч								
Результаты измерений рабочих характеристик параллельно работающих насосов								
Давление на всасывании до насосов $p_{XI}$ , Па								
Давление на нагнетании после насосов $p_{XII}$ , Па								
Суммарный напор $H_3$ , м вод. ст.								
Объёмный расход воды $Q_3$ , м <sup>3</sup> /ч								
Результаты теоретически определённых рабочих характеристик параллельно работающих насосов								
Суммарный напор $H_{3,теор}$ , м вод. ст.								
Объёмный расход воды $Q_{3,теор}$ , м <sup>3</sup> /ч								

## 2.7 Лабораторная работа № 7. Изучение работы насосов в режиме поддержания постоянного перепада давления

**Цель работы** заключается в изучении работы циркуляционного насоса в режиме поддержания постоянного перепада давления ( $\Delta p = \text{const}$ ).

**Порядок выполнения работы**, схема проведения которой приведена на рисунке 2.3, должен соответствовать указаниям производителя [10].

1. Необходимо закрыть шаровые краны I для отключения второго циркуляционных насосов IV от гидравлического контура, а краны II – открыть. Балансировочный клапан III перевести в полностью открытое положение. Циркуляционный насос IV при этом выключить.

2. Проводится запуск первого циркуляционного насос V в режиме поддержания постоянного перепада давления ( $\Delta p = \text{const}$ ) с установленной величиной максимального напора  $H = 6$  м.

3. Снимаются следующие показания:

- объёмный расход воды  $Q$ , м<sup>3</sup>/ч, с помощью расходомера VI;
- избыточное давление до циркуляционного насоса  $p_1$ , Па, с манометра VII;
- избыточное давление после циркуляционного насоса  $p_2$ , Па, с манометра VIII;
- потребляемая насосом из сети электрическая мощность  $N_{\text{эл}}$ , Вт, с ваттметра IX.

4. По формулам (2.1)...(2.3) находят значения  $N_{\text{пол}}$ ,  $H$  и  $\eta$ .

5. Проводят измерения постепенно уменьшая расход воды проходящий через балансировочный клапан путём изменения его настройки (не менее 8 раз). Интервал между каждым измерением должен составлять 90 с, что необходимо для адаптации электронного насоса к изменившимся внешним условиям.

Таблица 2.7 – Опытные и расчётные данные лабораторной работы № 7

Наименование и обозначение, ед. изм	Настройка балансировочного клапана							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Давление на всасывании $p_1$ , Па								
Давление на нагнетании $p_2$ , Па								
Напор насоса $H$ , м вод. ст.								
Объёмный расход воды $Q$ , м <sup>3</sup> /ч								
Полезная мощность $N_{\text{пол}}$ , Вт								
Потребляемая мощность $N_{\text{эл}}$ , Вт								
Коэффициент полезного действия $\eta$ , доля								

6. Результаты расчётов заносятся в таблицу 2.7. По данным таблицы строятся графические характеристики насоса  $H = f(Q)$ ,  $N_{эл} = f(Q)$  и  $\eta = f(Q)$ . Полученные графики сопоставляются с приведёнными на рисунке 1.5 данными.

### 2.8 Лабораторная работа № 8. Изучение работы насосов в режиме поддержания переменного перепада давления

**Цель работы** заключается в изучении работы циркуляционного насоса в режиме поддержания переменного перепада давления ( $\Delta p = \text{variable}$ ).

**Порядок выполнения работы**, схема проведения которой приведена на рисунке 2.3, должен соответствовать указаниям производителя [10].

1. Необходимо закрыть шаровые краны I для отключения второго циркуляционных насосов IV от гидравлического контура, а краны II – открыть. Балансировочный клапан III перевести в полностью открытое положение. Циркуляционный насос IV при этом выключить.

2-5. Те же, что и в лабораторной работе № 7.

6. Результаты расчётов заносятся в таблицу 2.7. По данным таблицы строятся графические характеристики насоса  $H = f(Q)$ ,  $N_{эл} = f(Q)$  и  $\eta = f(Q)$ . Полученные графики сопоставляются с приведёнными на рисунке 1.5 данными.

Таблица 2.8 – Опытные и расчётные данные лабораторной работы № 8

Наименование и обозначение, ед. изм	Настройка балансировочного клапана							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Давление на всасывании $p_1$ , Па								
Давление на нагнетании $p_2$ , Па								
Напор насоса $H$ , м вод. ст.								
Объёмный расход воды $Q$ , м <sup>3</sup> /ч								
Полезная мощность $N_{пол}$ , Вт								
Потребляемая мощность $N_{эл}$ , Вт								
Коэффициент полезного действия $\eta$ , доля								

### 2.9 Контрольные вопросы для самостоятельной работы

1. Опишите основные графические характеристики циркуляционных насосов.
2. Как определить характеристику гидравлического сопротивления сети?
3. Перечислите основные закономерности работы циркуляционных насосов при их последовательном и параллельном соединении.
4. Опишите особенности работы насосов в режимах  $\Delta p = \text{const}$  и  $\Delta p = \text{variable}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балансировочные клапаны STAD DN 15-50: техническая спецификация. – Ньон: IMI Hydronic Engineering, 2014. – 12 с.
2. Бромлей, М.Ф. Гидравлические машины и установки / М.Ф. Бромлей. – Москва: Стройиздат, 1971. – 260 с.
3. Вахвахов, Г.Г. Работа вентиляторов в сети / Г.Г. Вахвахов. – Москва: Стройиздат, 1975. – 101 с.
4. Дячек, П.И. Насосы, вентиляторы, компрессоры: учеб. пос. / П.И. Дячек. – Москва: Изд-во АСВ, 2012. – 432 с.
5. Калинушкин, М.П. Вентиляторные установки / М.П. Калинушкин. – Москва: Высшая школа, 1962. – 294 с.
6. Манометры технические показывающие (мановакуумметры) // ЗАО «РОСМА» – манометры, вакуумметры, мановакуумметры URL: <https://rosma.spb.ru/manometers/> (дата обращения: 09.09.2021)
7. Поляков, В.В. Насосы и вентиляторы / В.В. Поляков, Л.С. Скворцов. – Москва: Стройиздат, 1990. – 336 с.
8. Расходомер-счётчик электромагнитный Питерфлоу исполнения РС: руководство по эксплуатации. – Санкт-Петербург: ООО «Термотроник», 2020. – 24 с.
9. Соломахова, Т.С. Центробежные вентиляторы: справочник / Т.С. Соломахова, К.В. Чебышева. – Москва: Машиностроение, 1980. – 176 с.
10. Сперанский, П.В. Центробежные насосы: учеб. пос. к лаб. раб. / П.В. Сперанский. – Москва: Wilo, 2019. – 26 с.
11. Wilo-Stratos MAXO/-D/-Z: каталог – Дортмунд: Wilo, 2018. – 2848 с.
12. Wilo-TOP-S 40/10: технический паспорт. – Дортмунд: Wilo, 2016. – 4 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Описание лабораторной установки.....	5
1.1 Циркуляционные насосы.....	6
1.2 Контрольно-измерительные приборы и средства регулирования.....	11
1.3 Общие сведения о характеристиках и режимах работы насосов.....	13
1.3.1 Характеристика гидравлической сети.....	13
1.3.2 Метод наложения характеристик.....	14
1.3.3 Параллельная работа насосов в сети.....	16
1.3.4 Последовательная работа насосов в сети.....	19
1.4. Контрольные вопросы для самостоятельной работы.....	21
2 Практикум по исследованию характеристик и режимов работы циркуляционных насосов.....	23
2.1 Лабораторная работа № 1. Построение графических характеристик циркуляционного насоса.....	23
2.2 Лабораторная работа № 2. Построение характеристики сети.....	25
2.3 Лабораторная работа № 3. Определение зависимостей графических характеристик насоса от частоты вращения его рабочего колеса.....	27
2.4 Лабораторная работа № 4. Изучение совместной работы последовательно соединённых насосов с одинаковыми характеристиками.....	29
2.5 Лабораторная работа № 5. Изучение совместной работы последовательно соединённых насосов с различными характеристиками.....	33
2.6 Лабораторная работа № 6. Изучение совместной работы параллельно соединённых насосов с одинаковыми характеристиками.....	34
2.7 Лабораторная работа № 7. Изучение работы насосов в режиме поддержания постоянного перепада давления.....	36
2.8 Лабораторная работа № 8. Изучение работы насосов в режиме поддержания переменного перепада давления.....	37
2.9 Контрольные вопросы для самостоятельной работы.....	37
Список литературы.....	38

Бодров Михаил Валерьевич  
Кузин Виктор Юрьевич  
Морозов Максим Сергеевич

Практикум по исследованию характеристик  
и режимов работы циркуляционных насосов

*Учебное пособие*

Подписано в печать 14.12.2021г. Формат 60×90 1/8. Бумага газетная. Печать трафаретная.  
Уч. изд. л. 4,5. Усл. печ. л. 4,9. Тираж 300 экз. Заказ № \_\_\_\_

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»  
603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65  
Полиграфический центр ННГАСУ, 603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65  
<http://www.nngasu.ru>, [srec@nngasu.ru](mailto:srec@nngasu.ru)