

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

А. Ю. Плавич, П. В. Сперанский, И. С. Александров

НАСОСНЫЕ И ВОЗДУХОДУВНЫЕ СТАНЦИИ

Утверждено редакционно-издательским советом ФГБОУ ВО «КГТУ» в
качестве учебно-методического пособия по лабораторным работам по
направлению подготовки 08.03.01 - «Строительство»

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2022

УДК 628.12 (076)

Рецензент

доктор технических наук, профессор кафедры строительства ФГБОУ ВО
«Калининградский государственный технический университет»

А.А. Герасимов

Плавич, А.Ю., Сперанский, П.В., Александров, И.С.

Насосные и воздуходувные станции: учеб.-методич. пособие по лабораторным работам для студ. бакалавриата по направлению подгот. 08.03.01 Строительство / А. Ю. Плавич, П. В. Сперанский, И. С. Александров. – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – 43 с.

В учебно-методическом пособии по дисциплине «Насосные и воздуходувные станции» представлены типовые лабораторные работы, демонстрирующие основные приёмы работы, методы регулирования, исследования характеристик насосного и вентиляционного оборудования. Учебно-методическое пособие содержит полный алгоритм выполнения работ с примерами обработки результатов экспериментов, их анализ, необходимые справочные данные для выполнения заданий.

Рис. – 20, табл. – 13 список лит. – 4 наименования

Учебно-методическое пособие рассмотрено и одобрено методической комиссией института морских технологий, энергетики и строительства 30.06.2022 г., протокол № 6.

УДК 628.12 (076)

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет», 2022 г.

© Плавич А. Ю., Сперанский П. В., Александров И. С., 2022 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТЫ	5
1. ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ НАСОСЫ. ОПИСАНИЕ СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ.....	5
1.1. Лабораторная работа №1. Построение характеристик центробежного насоса.....	10
1.2. Лабораторная работа №2. Изучение влияния частоты вращения рабочего колеса на характеристики центробежных насосов	12
1.3. Лабораторная работа №3. Определение характеристики сети	15
1.4. Лабораторная работа №4. Совместная работа последовательно соединенных насосов, имеющих одинаковые характеристики	17
1.5. Лабораторная работа №5. Совместная работа параллельно соединенных насосов, имеющих одинаковые характеристики.....	19
1.6. Лабораторная работа №6. Совместная работа последовательно соединенных насосов, имеющих разные характеристики.....	21
1.7. Лабораторная работа №7. Работа электронного циркуляционного насоса в режиме $\Delta p = \text{const}$	23
1.8. Лабораторная работа №8. Работа электронного циркуляционного насоса в режиме $\Delta p = \text{variable}$	24
2. ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ ВЕНТИЛЯТОРЫ. ОПИСАНИЕ СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ	27
2.1. Лабораторная работа №9. Получение характеристик центробежного вентилятора с использованием дросселирования.....	29
2.2. Лабораторная работа №10. Получение характеристик центробежного вентилятора с использованием вариации частотой вращения	37
2.3. Лабораторная работа №11. Сравнение экономической эффективности способов регулирования центробежного вентилятора	37
2.4. Лабораторная работа №12. Апробация теоретических законов пропорциональных режимов работы центробежных машин	42
Литература.....	43

ВВЕДЕНИЕ

Целью освоения дисциплины «Насосные и воздухоудувные станции» является изучение основных понятий, законов, методов, приёмов и средств проектирования и эксплуатации водопроводных систем с нагнетателями.

Задачи изучения дисциплины:

- изучение основных понятий, методов, приёмов и средств расчёта и подбора оборудования насосных и воздухоудувных станций;
- формирование соответствующих знаний, умений и навыков в области строительства, а также компетенций с учётом ФГОС ВО;
- изучение принципов действия нагнетателей, схем и технологических процессов;
- изучение методик применения ЭВМ для расчётов систем с нагнетателями;
- освоение проектирования: выполнение расчётно-пояснительной документации и графического материала.

В результате освоения дисциплины студент должен:

- знать нормативную базу использования ресурсов в сфере строительства; основные цели строительного предприятия и задачи, которые необходимо решить для их достижения; основные термины и законы в области насосов и воздухоудувных станций;
- уметь разрабатывать, обосновывать и внедрять конкретный план обеспечения ресурсами сферу насосов и воздухоудувных станций на основе действующего законодательства, имеющихся ресурсов и ограничений;
- владеть навыками определения потребности в материальных и человеческих ресурсах, необходимых для выполнения поставленных задач; навыками выбора оптимальных способов решения задач, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений.

Цели и задачи лабораторного практикума соответствуют целям и задачам освоения дисциплины, ориентированы на практическую работу с оборудованием.

После выполнения лабораторных работ студент должен овладеть знаниями, умениями и навыками работы с насосным и вентиляционным оборудованием, методам его регулировки, оптимизации работы, способностью анализировать полученные экспериментальные данные.

С целью обеспечения удобства использования студентами учебно-методическое пособие содержит полный алгоритм выполнения работ с примерами обработки результатов экспериментов, их анализ, необходимые справочные данные для выполнения заданий.

Результатом выполнения лабораторных работ является отчёт по формам, представленным в методическом пособии, который выносится на защиту и учитывается при аттестации по дисциплине.

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТЫ

Без разрешения преподавателя или лаборанта категорически запрещается включать и выключать приборы, рубильники, пусковые кнопки и т.д. О всех замеченных неполадках и неисправностях немедленно ставить в известность преподавателя или лаборанта. Перед проведением лабораторной работы необходимо освоить её алгоритм, получить допуск к выполнению работы у преподавателя или лаборанта.

1. ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ НАСОСЫ. ОПИСАНИЕ СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

Схема лабораторного стенда для исследования работы центробежных насосов показана на рис. 1.



Рисунок. 1. Стенд для испытаний центробежных насосов

Установка представляет собой замкнутый контур, оснащённый мембранным баком для компенсации температурных расширений жидкости (смонтирован на задней стороне стенда). Трубопроводы заполняются (опорожняются) водой через патрубок с краном 5. Удаление воздуха происходит через автоматические воздухоотводчики 6. Для эффективного удаления остатков воздуха после заполнения системы рекомендуется произвести запуск насосов в разных режимах (по отдельности, параллельно, последовательно).

В системе установлено два центробежных циркуляционных насоса с мокрым ротором Wilo-Stratos MAXO 40/0,5-12 (1) и WiloTOP-S 40/10 (2). Первый насос относится к группе 3 высокоэффективных насосов с бесступенчатым регулированием числа оборотов. Рабочие характеристики данного насоса показаны на рис. 2, 3 и 4.

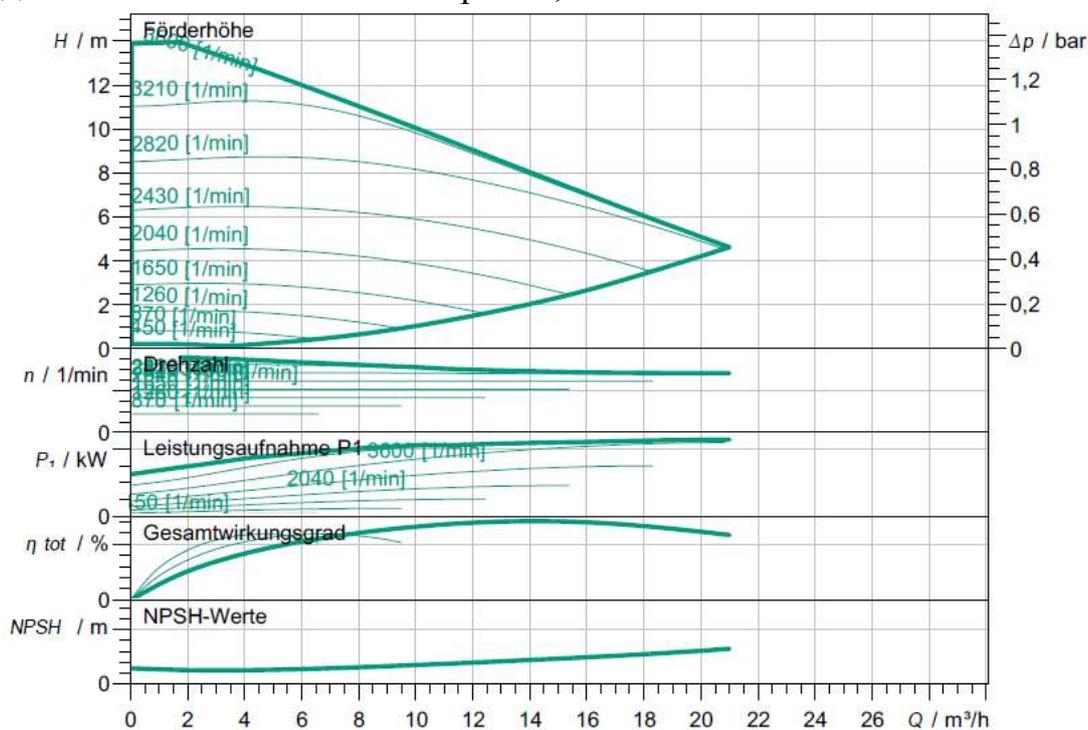


Рисунок. 2. Рабочие характеристики насоса Wilo-Stratos MAXO 40/0,5-12 в режиме ручного регулирования числа оборотов

Расшифровка обозначения:

Stratos MAXO – серия насоса;

40 – условный проход, мм;

0,5 – 12 – диапазон изменения напора, м.

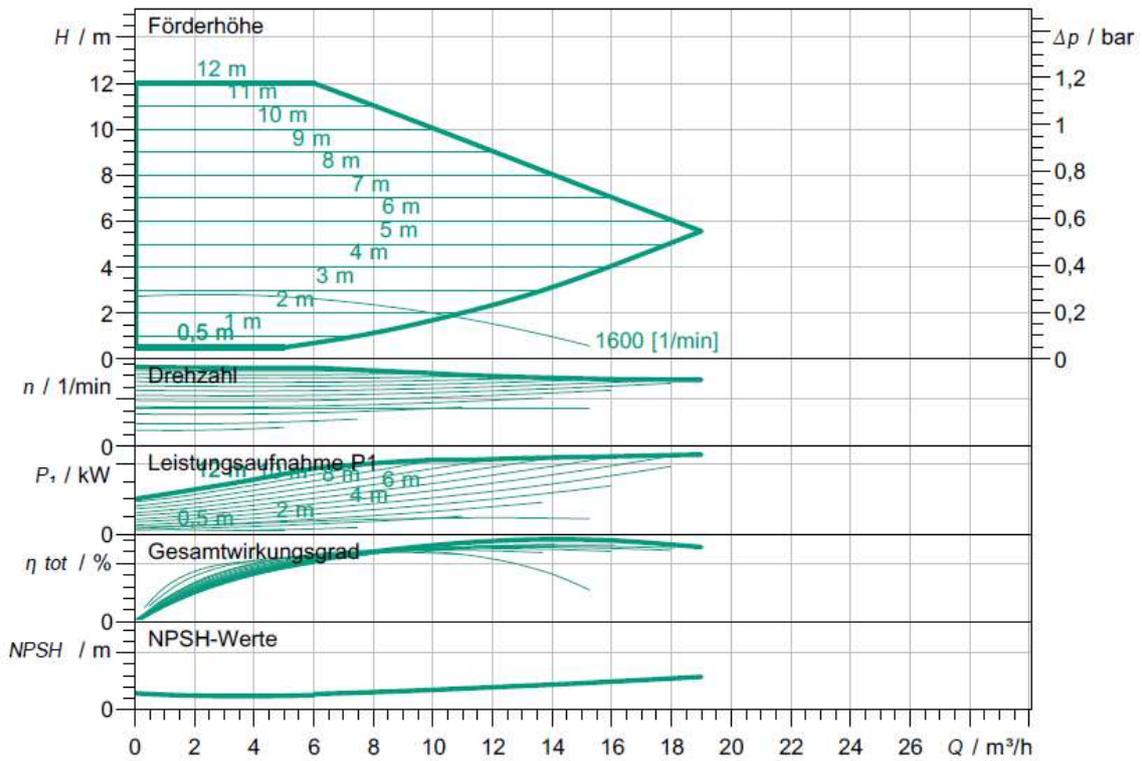


Рисунок. 3. Рабочие характеристики насоса Wilo-Stratos MAXO 40/0,5-12 в режиме $\Delta P - c$ (constant)

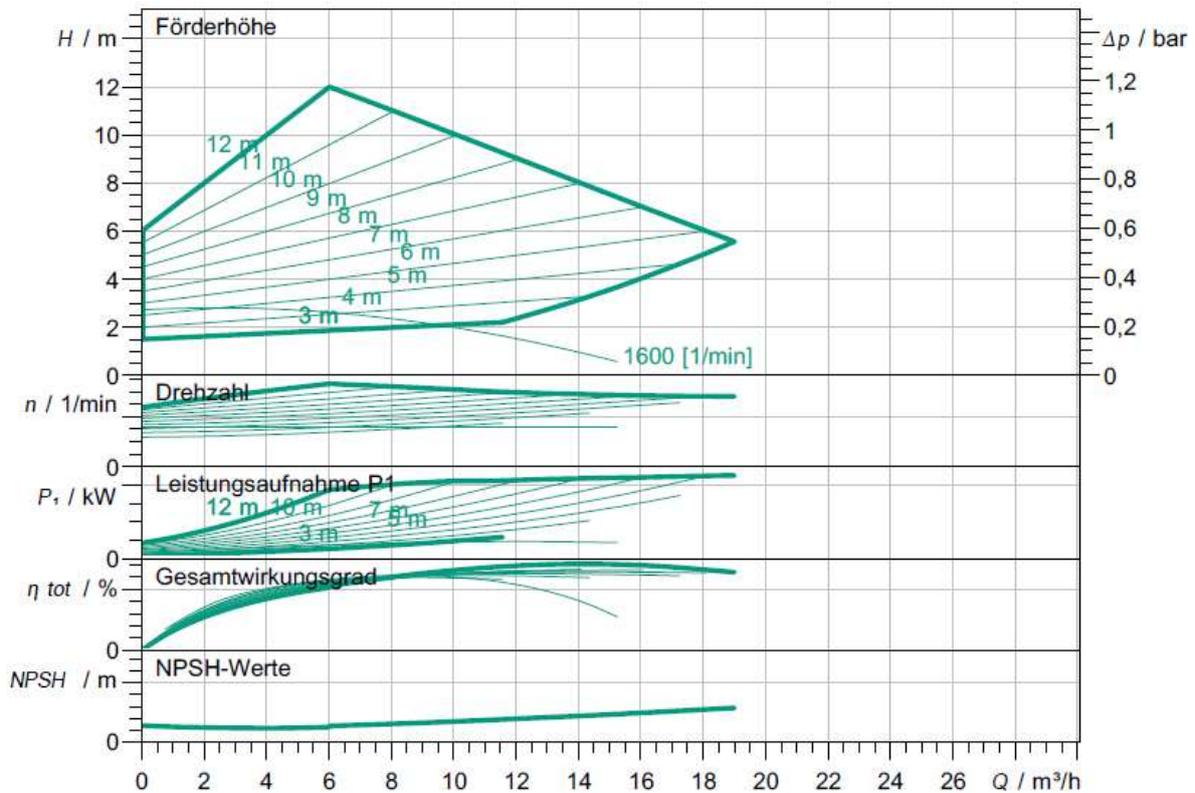


Рисунок. 4. Рабочие характеристики насоса Wilo-Stratos MAXO 40/0,5-12 в режиме $\Delta P - v$ (variable)

Второй насос относится к группе стандартных насосов и имеет две скорости вращения ротора. Рабочие характеристики данного насоса показаны на рис. 5.

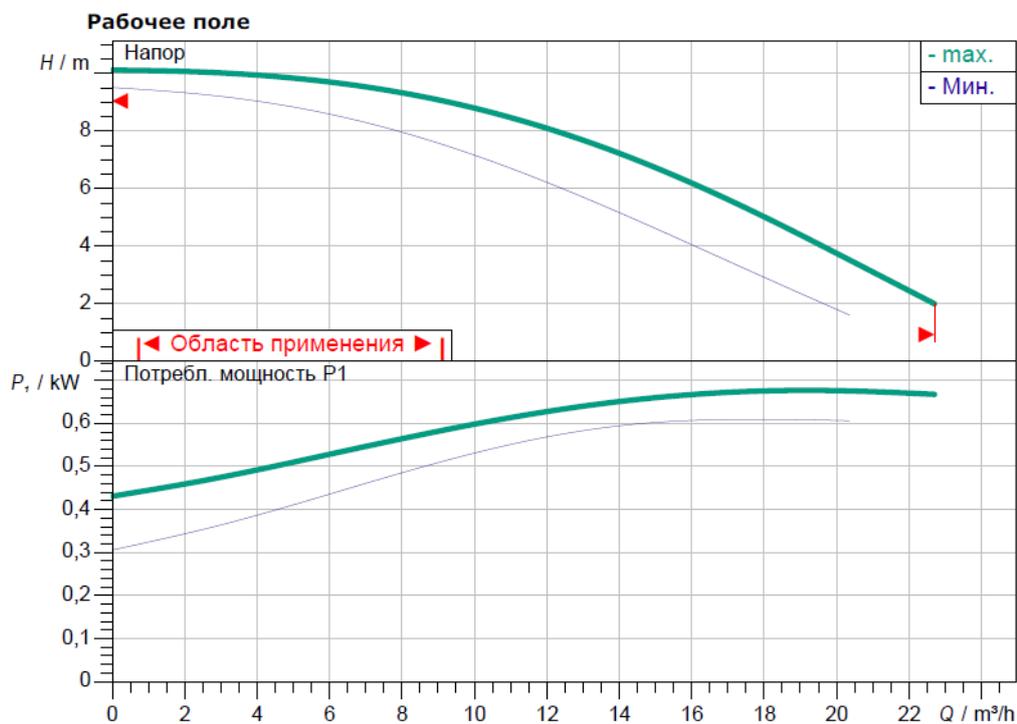


Рисунок. 5. Рабочие характеристики насоса Wilo-TOP-S 40/10

Расшифровка обозначения:

TOP-S – серия насоса;

40 – условный проход, мм;

10 – максимальный напор при нулевой подаче, м.

Каждый насос оборудован манометрами для измерения избыточного статического давления до и после насоса (7-10), запорной арматурой (11–14) и обратными клапанами 15, 16. Обвязка насосов позволяет осуществлять как параллельное, так и последовательное их подключение. Для последовательного соединения служит перепускной трубопровод с запорным вентилем 17.

Каждый насос оснащен ваттметром 18, 19 для измерения потребляемой из сети мощности.

Включение/выключение насосов осуществляется переключателями 20 и 21. Подключение питания стенда (однофазное напряжение 220 В) осуществляется кабелем с вилкой через автоматический выключатель, расположенный справа на боковой поверхности стенда.

Изменение сопротивления сети (расхода воды) осуществляется регулятором расхода 3. Расход жидкости в сети измеряется расходомером 4.

В общем случае напор H , м, создаваемый насосом, определяется по формуле

$$H = \frac{p_{п2} - p_{п1}}{\rho g}, \quad (1)$$

где $p_{п2}$ – полное избыточное давление после насоса, Па; $p_{п1}$ – полное избыточное давление до насоса, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м³ (в процессе выполнения работ вода в контуре нагревается, и её плотность можно принять в среднем равной 990 кг/м³); g – ускорение свободного падения, м/с².

Поскольку в данной системе диаметры всасывающего и напорного трубопроводов в точках измерения одинаковы, соответственно прирост динамического давления равен нулю и формулу (1) можно переписать в виде

$$H = \frac{p_{ст2} - p_{ст1}}{\rho g}, \quad (2)$$

где $p_{ст2}$ – статическое избыточное давление после насоса, Па; $p_{ст1}$ – статическое избыточное давление до насоса, Па.

Потери напора на участках между контрольными точками (манометрами) и насосом очень малы, поэтому при расчете напора насоса в лабораторных работах ими можно пренебречь. Статическое избыточное давление до и после насоса измеряется манометрами.

Полезная мощность $N_{пол}$, Вт, развиваемая насосом, рассчитывается по формуле

$$N_{пол} = \rho g Q H, \quad (3)$$

где $\rho=990$ кг/м³ – плотность жидкости; Q – производительность насоса, м³/с; H – напор насоса, м; g – ускорение свободного падения, м/с².

Часто применяется альтернативная формула

$$N_{пол} = \rho Q H / 367, \quad (3a)$$

где $\rho=990$ кг/м³ – плотность жидкости; Q – производительность насоса, м³/ч; H – напор насоса, м.

Мощность, потребляемая из электросети P_1 , кВт, определяется по показаниям ваттметров. Мощность на валу P_2 для насосов с мокрым ротором не выделяется, поскольку мотор и гидравлическая часть насоса представляют собой единое целое. В каталогах на насосы с мокрым ротором так же приводятся значения P_1 .

КПД насоса с мокрым ротором (насосного агрегата) можно посчитать по формуле

$$КПД = N_{пол} / P_1. \quad (4)$$

При изменении числа оборотов рабочего колеса центробежного насоса с n_1 до n_2 , его характеристики изменяются согласно следующим зависимостям:

$$H_2 = H_1 (n_2 / n_1)^2, \quad (5)$$

$$Q_2 = Q_1 (n_2 / n_1), \quad (6)$$

$$P_{1(2)} = P_{1(1)} (n_2 / n_1)^3. \quad (7)$$

КПД насоса при этом изменяется незначительно.

1.1. Лабораторная работа №1. Построение характеристик центробежного насоса

Цель лабораторной работы.

Формирование умения определять взаимосвязь между основными параметрами центробежных машин.

Задание.

Определять взаимосвязь между основными параметрами центробежных машин на основе опытных данных, полученных при испытании центробежного насоса.

Графически выраженные зависимости между напором, мощностью, коэффициентом полезного действия и производительностью называют индивидуальными характеристиками нагнетателя. Совокупность индивидуальных характеристик, построенных на одном графике, называется полной характеристикой.

Характеристики нагнетателей определяются экспериментально.

Методические указания по выполнению работы

1. Произвести запуск насоса 2 при закрытом кране 14 на напорном трубопроводе и открытом кране 13 на всасывающем трубопроводе. Второй насос при этом должен быть отключен от системы при помощи запорной арматуры на всасывающем и напорном трубопроводах (вентили 11, 12 и 17 закрыты). Регулятор расхода 3 в полностью открытом положении. Насос исследуется при максимальном числе оборотов рабочего колеса. Установка числа оборотов проводится в соответствии с инструкцией по монтажу и эксплуатации насоса.

2. Полностью открыть кран 14. Провести измерения: расхода жидкости расходомером 4; давления перед насосом манометром 9; давления после насоса манометром 10; мощности, потребляемой электродвигателем, ваттметром 19.

3. Уменьшая расход жидкости от максимального до нулевого путем постепенного закрытия регулятора расхода 3, провести все измерения минимум восемь раз.

4. По экспериментальным данным рассчитать параметры насоса H , $N_{\text{пол}}$, КПД.

5. Опытные и расчетные данные занести в табл. 1.

6. На основании экспериментальных и расчетных данных построить характеристики центробежного насоса $H = f(Q)$, $P_1 = f(Q)$, $\text{КПД} = f(Q)$.

7. Сравнить полученные характеристики с данными каталога, построив их на одном графике.

Таблица 1

Опытные и расчетные данные

Наименование величин	Обозначение	Размерность	Положение регулирующего органа							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Производительность насоса	Q	м ³ /ч								
Давление на всасывании	$p_{сг1}$	Па								
Давление на нагнетании	$p_{сг2}$	Па								
Напор, создаваемый насосом	H	м								
Полезная мощность насоса	$N_{пол}$	Вт								
Мощность, потребляемая из электросети	P_1	Вт								
КПД насоса	КПД	—								

Контрольные вопросы

1. Что называется полной характеристикой нагнетателя?
2. Какие приборы необходимы для определения напора насоса?
3. Возможно ли теоретическое определение характеристик центробежного нагнетателя?

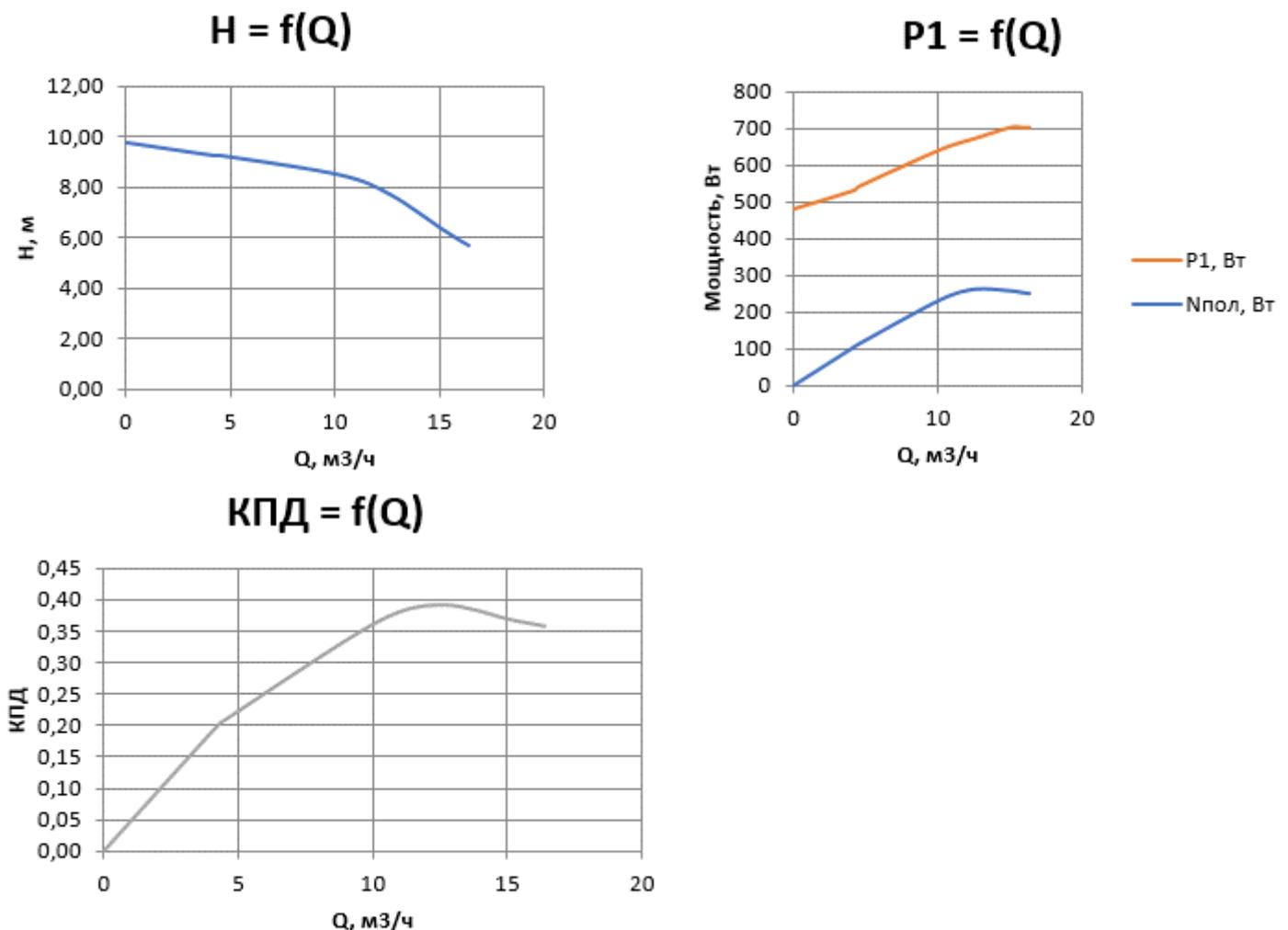


Рисунок. 6. Примерный вид экспериментальных характеристик

1.2. Лабораторная работа №2. Изучение влияния частоты вращения рабочего колеса на характеристики центробежных насосов

Цель лабораторной работы.

Формирование умения определять влияние частоты вращения рабочего колеса на характеристики центробежных насосов.

Задание.

Провести испытание центробежного насоса при различной частоте вращения рабочего колеса с целью выявления зависимости его характеристик от числа оборотов.

В процессе работы измеряются напор, производительность, мощность и коэффициент полезного действия (КПД) при двух значениях числа оборотов рабочего колеса.

Методические указания по выполнению работы

1. Произвести запуск насоса 1 при закрытом кране 12 на напорном трубопроводе и открытом кране 11 на всасывающем трубопроводе. Второй насос при этом должен быть отключен от системы при помощи запорной арматуры на всасывающем и напорном трубопроводах (вентили 13, 14 и 17 закрыты). Регулятор расхода 3 в полностью открытом положении. Насос исследуется при числе оборотов рабочего колеса $n_1 = 2820$ об/мин. Установка числа оборотов проводится в соответствии с инструкцией по монтажу и эксплуатации насоса.

2. Полностью открыть кран 12. Провести измерения: расхода жидкости расходомером 4; давления перед насосом манометром 7; давления после насоса манометром 8; мощности, потребляемой электродвигателем, ваттметром 18.

3. Уменьшая расход жидкости от максимального до нулевого путем постепенного закрытия регулятора расхода 3, провести все измерения минимум восемь раз.

4. По экспериментальным данным рассчитать параметры насоса H , $N_{\text{пол}}$, КПД.

5. Опытные и расчетные данные занести в табл. 2.

6. Выполнить пункты 1–5 при меньшем числе оборотов рабочего колеса $n_2 = 2430$ об/мин.

7. На основании экспериментальных и расчетных данных построить характеристики центробежного насоса, а именно:

$$H = f(Q)$$

- при частоте 2820 об/мин;

- при частоте 2430 об/мин;

- теоретически рассчитанная кривая при частоте 2430 об/мин (см. п. 8);

$$P_1 = f(Q)$$

- при частоте 2820 об/мин;

- при частоте 2430 об/мин;

- теоретически рассчитанная кривая при частоте 2430 об/мин (см. п. 8);
- КПД = $f(Q)$
- при частоте 2820 об/мин;
- при частоте 2430 об/мин.

8. На том же графике построить характеристики насоса при $n_2 = 2430$ об/мин, полученные путем теоретического пересчета рабочих характеристик для $n_1 = 2820$ оборотов. Для этого, на экспериментальной характеристике насоса при n_1 необходимо выбрать ряд точек (8 точек с равными интервалами по расходу) и пересчитать для каждой точки значения расхода, напора и мощности для сниженного числа оборотов по формулам (5) – (7).

9. Сравнить полученные практическим и теоретическим путем характеристики при снижении числа оборотов с n_1 до n_2 .

Таблица 2

Опытные и расчетные данные

Наименование величин	Обозначение	Размерность	Положение регулирующего органа							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Экспериментальное определение рабочих характеристик при n_1										
Производительность насоса	Q	$м^3/ч$								

Продолжение табл. 2

Наименование величин	Обозначение	Размерность	Положение регулирующего органа							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Давление на всасывании	$p_{ст1}$	Па								
Давление на нагнетании	$p_{ст2}$	Па								
Напор, создаваемый насосом	H_1	м								
Полезная мощность насоса	$N_{пол}$	Вт								
Мощность, потребляемая из электросети	$P_{1(1)}$	Вт								
КПД насоса	КПД	–								
Экспериментальное определение рабочих характеристик при n_2										
Производительность насоса	Q	м ³ /ч								
Давление на всасывании	$p_{ст1}$	Па								
Давление на нагнетании	$p_{ст2}$	Па								
Напор, создаваемый насосом	H_2	м								
Полезная мощность насоса	$N_{пол}$	Вт								
Мощность, потребляемая из электросети	$P_{1(2)}$	Вт								
КПД насоса	КПД	–								
Теоретически рассчитанные по формулам (5) – (7) параметры для n_2										
Производительность насоса при n_1	Q	м ³ /ч								
Напор, создаваемый насосом, при n_1	H	м								
Мощность, потребляемая из электросети, при n_1	P_1	кВт								
Производительность насоса при n_2	$Q^{теор}$	м ³ /ч								
Напор, создаваемый насосом, при n_2	$H^{теор}$	м								
Мощность, потребляемая из электросети, при n_2	$P_1^{теор}$	Вт								

Контрольные вопросы

1. Как изменяются характеристики центробежных насосов при уменьшении числа оборотов рабочего колеса?
2. Какие существуют способы для изменения числа оборотов рабочего колеса центробежного насоса?
3. Как изменяется КПД центробежного насоса при уменьшении числа оборотов рабочего колеса?

1.3. Лабораторная работа №3. Определение характеристики сети

Цель лабораторной работы.

Формирование умения определять характеристику сети.

Задание.

Ознакомиться с методами построения характеристики сети. Уяснить влияние отдельных факторов на вид характеристики.

Сетью называется совокупность всасывающих и нагнетательных трубопроводов, арматуры, отопительных приборов, насосов и т.д. В общем случае при перемещении среды давление, создаваемое нагнетателем, затрачивается на подъём жидкости, преодоление разности давлений во всасывающей и напорной ёмкостях, на преодоление сопротивления сети и создание динамического давления потока среды на выходе из сети. Из этого следует, что величина создаваемого нагнетателем давления и его производительность зависят не только от самой гидравлической машины, но и от свойств сети, которую обслуживает нагнетатель.

Зависимость потерь давления в сети Δp от расхода среды Q через неё называется характеристикой сети. Характеристика сети может быть выражена графически и аналитически. В общем случае уравнение характеристики сети имеет вид

$$\Delta p = k \cdot Q^n, \quad (8)$$

где k – коэффициент гидроаэродинамического сопротивления.

Показатель степени n изменяется в диапазоне $1 \leq n \leq 2$. Его величина определяется режимом течения жидкости. Для турбулентного режима, который наиболее часто реализуется на практике, $n = 2$ и характеристика сети для замкнутого циркуляционного контура представляет собой квадратичную параболу, исходящую из начала координат

$$\Delta p = k \cdot Q^2. \quad (9)$$

Поскольку в замкнутом отопительном контуре все давление, создаваемое циркуляционным насосом, расходуется на преодоление сопротивления сети, то полная потеря давления в сети соответствует давлению, создаваемому циркуляционным насосом, Па

$$\Delta p = p_{cm2} - p_{cm1}. \quad (10)$$

Коэффициент гидроаэродинамического сопротивления для каждого опыта определяется по формуле

$$k_i = \frac{\Delta p}{Q^2}, \quad (11)$$

где Q – расход жидкости в сети, м³/ч.

Средняя величина коэффициента гидроаэродинамического сопротивления:

$$k_{cp} = \frac{\sum k_i}{m}, \quad (12)$$

где m – количество опытов в серии.

Методические указания по выполнению работы

1. Произвести запуск насоса 1 при закрытом кране 12 на напорном трубопроводе и открытом кране 11 на всасывающем трубопроводе. Второй насос при этом должен быть отключен от системы при помощи запорной арматуры на всасывающем и напорном трубопроводах (вентили 13, 14 и 17 закрыты). Регулятор расхода 3 в полностью открытом положении. Насос запускается при максимальном числе оборотов рабочего колеса. Установка числа оборотов проводится в соответствии с инструкцией по монтажу и эксплуатации насоса.

2. Полностью открыть кран 12. Провести измерения: расхода жидкости расходомером 4; давления перед насосом манометром 7; давления после насоса манометром 8.

3. Изменяя характеристику насоса путем изменения числа оборотов от максимального (3600 об/мин) до минимального (450 об/мин), провести все измерения восемь раз.

4. По экспериментальным данным рассчитать величины Δp , k_i , k_{cp} .

5. Опытные и расчетные данные занести в табл. 3.

6. На основании экспериментальных и расчетных данных по уравнению $\Delta p = k_{cp} \cdot Q^2$ построить характеристику сети.

7. Все эксперименты провести для двух типов сетей – с малым и большим сопротивлением. Увеличить сопротивление сети можно путем частичного закрытия регулятора расхода 3. Обе характеристики сети необходимо построить на одном графике.

Таблица 3

Опытные и расчетные данные

Наименование величин	Обозначение	Размерность	Опыты															
			сеть №1								сеть №2							
			1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
Расход воды в сети	Q	м ³ /ч																
Статическое давление на выходе из насоса	p_{cm2}	Па																
Статическое давление на входе в насос	p_{cm1}	Па																
Потеря давления в сети	Δp	Па																
Коэффициент гидроаэродинамического сопротивления	k_i																	

Средняя величина коэф- фициента гидродина- мического сопротивления	$k_{ср}$			
--	----------	--	--	--

Контрольные вопросы

1. Какие факторы оказывают влияние на параметры характеристики сети?
2. Какую кривую описывает точка пересечения характеристики сети и характеристики нагнетателя при изменении угловой скорости вращения рабочего колеса нагнетателя?
3. Какую кривую описывает рабочая точка при изменении сопротивления сети?

1.4. Лабораторная работа №4. Совместная работа последовательно соединенных насосов, имеющих одинаковые характеристики

Цель лабораторной работы.

Формирование умения анализировать последовательную работу двух одинаковых центробежных насосов.

Задание.

Исследовать особенности совместной работы последовательно соединенных центробежных насосов. Изучить построение суммарной характеристики насосов.

Последовательное соединение насосов применяется с целью увеличения давления (напора) в сети. Такой способ соединения применяется, если один из имеющихся насосов не может преодолеть сопротивление сети при заданной производительности. Для построения совместной характеристики последовательно работающих насосов необходимо сложить напоры нагнетателей при одинаковой производительности.

Методические указания по выполнению работы

1. Построение характеристик каждого насоса, работающего отдельно. Для обеспечения насосами одинаковых характеристик необходимо установить на насосе Wilo-TOP-S максимальное число оборотов, а на насосе Wilo-Stratos MAHO – 3070 об/мин.

Результаты замеров заносятся в табл. 4. По результатам замеров и необходимых расчетов на одном графике строятся рабочие характеристики $H = f(Q)$ каждого насоса, работающего в отдельности (при правильном проведении эксперимента, полученные характеристики должны практически совпадать).

Допускается использовать характеристику насоса Wilo-TOP-S, полученную в лабораторной работе №1.

2. Построение суммарной характеристики (практической) двух последовательно работающих насосов по результатам лабораторных измерений. При последовательном включении насосов весь расход жидкости последовательно проходит через каждый из нагнетателей. Для этого необходимо закрыть краны 11, 14 и открыть краны 12, 13, 17. Давление на выходе из установки определяется манометром 8, на входе – манометром 9.

Поскольку в перемычке между насосами будут возникать существенные потери, при расчете напора последовательно работающих насосов необходимо их учесть по разнице показаний манометров 7 и 10, а так как данные манометры расположены на разных уровнях (разность отметок установки манометров $Z = 0,55$ м), к показаниям верхнего манометра нужно добавить давление столба жидкости высотой Z , Па.

Кроме того, поскольку манометры 8 и 9 расположены на разных уровнях, при расчете напора необходимо учесть геометрическую высоту подъема жидкости Z , м.

Таким образом, суммарный напор в данной системе при последовательном соединении определяется по формуле

$$H = (p_{ст8} - p_{ст9}) / \rho g + (p_{ст10} - (p_{ст7} + \rho g Z)) / (\rho g) + Z, .$$

После преобразования данная формула примет вид:

$$H = ((p_{ст8} - p_{ст9}) + (p_{ст10} - p_{ст7})) / (\rho g). \quad (13)$$

3. Используя данные первого этапа, строится теоретическая суммарная характеристика двух последовательно соединенных насосов (на том же графике). Для построения суммарной характеристики последовательно работающих насосов выбирают ряд значений расхода воды в сети. Складывая для каждого из выбранных расходов соответствующие значения напоров, развиваемых каждым насосом в отдельности (для насосов, имеющих одинаковые характеристики, производится удвоение напора, создаваемого одним насосом), получаем ряд точек суммарной характеристики. Соединяя полученные точки плавной линией, получаем суммарную характеристику.

4. Сравнение суммарных характеристик, полученных на втором и третьем этапах.

Таблица 4

Опытные и расчетные данные

Наименование величин	Обозначение	Размерность	Положение регулирующего органа						
1 этап									
<i>Насос №1 при 3070 об/мин</i>									
Производительность	Q_1	м ³ /ч							
Напор	H_1	м							

<i>Насос №2</i>										
Производительность	Q_2	м ³ /ч								
Напор	H_2	м								
2 этап										
Производительность при последовательно работающих насосах	Q	м ³ /ч								
Напор при последовательно работающих насосах	H	м								

Контрольные вопросы

1. Как определяются параметры насосов, работающих в сети последовательно?
2. При какой характеристике сети целесообразно последовательное включение нагнетателей?
3. В каких системах используется последовательно соединение насосов?

1.5. Лабораторная работа №5. Совместная работа параллельно соединенных насосов, имеющих одинаковые характеристики

Цель лабораторной работы.

Формирование умения анализировать параллельную работу двух одинаковых центробежных насосов.

Задание.

Исследовать особенности совместной работы параллельно соединенных центробежных насосов. Изучить построение суммарной характеристики насосов.

Параллельное соединение насосов применяется для увеличения расхода жидкости в сети. При параллельном соединении насосы подают жидкость в общую сеть, причем через каждый насос проходит половина общего расхода (при работе насосов с одинаковыми характеристиками). В месте соединения потоков устанавливается некоторое общее для обоих потоков давление, а расход будет равен сумме расходов обоих нагнетателей.

Отсюда следует, что при построении суммарной характеристики параллельно соединенных насосов суммируются производительности насосов при одинаковых напорах.

Методические указания по выполнению работы

1. Построение характеристик каждого насоса, работающего отдельно. Для обеспечения насосами одинаковых характеристик необходимо установить на

насосе Wilo-TOP-S максимальное число оборотов, а на насосе Wilo-Stratos MAHO – 3070 об/мин.

Результаты замеров заносятся в табл. 5. По результатам замеров и необходимых расчетов на одном графике строятся рабочие характеристики $H = f(Q)$ каждого насоса, работающего в отдельности (при правильном проведении эксперимента, полученные характеристики должны практически совпадать).

Допускается использовать характеристики насосов, полученные в лабораторных работах №1 и №4.

2. На том же графике строится суммарная характеристика (практическая) двух параллельно работающих насосов по результатам лабораторных измерений. Для параллельного включения насосов в сеть необходимо открыть краны 11, 12, 13, 14. Кран 17 на перемычке должен быть закрыт. Давление на выходе из установки определяется манометром 10, на входе – манометром 9. Использование манометров, установленных на удалении от точек соединения потоков вносит определенную погрешность в результаты измерений.

3. На том же графике, используя данные первого этапа, строится теоретическая суммарная характеристика двух параллельно соединенных насосов. Для построения суммарной характеристики параллельно работающих насосов выбирают ряд значений напора. Складывая для каждого из выбранных значений напора соответствующие значения расходов (для одинаковых насосов производится удвоение расхода), получаем ряд точек суммарной характеристики. Соединяя полученные точки плавной линией, получаем суммарную характеристику.

4. Проводится сравнение суммарных характеристик, полученных на втором и третьем этапах.

Таблица 5

Опытные и расчетные данные

Наименование величин	Обозначение	Размерность	Положение регулирующего органа							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1 этап										
<i>Насос №1 при 3070 об/мин</i>										
Расход	Q_1	м ³ /ч								
Напор	H_1	м								
<i>Насос №2</i>										
Расход	Q_2	м ³ /ч								
Напор	H_2	м								
2 этап										
Производительность при параллельно работающих насосах	Q	м ³ /ч								
Напор при параллельно работающих насосах	H	м								

Контрольные вопросы

1. Как определяются параметры насосов, работающих в сети параллельно?
2. При какой характеристике сети целесообразно параллельное включение насосов?
3. С какой целью применяется параллельное включение насосов?

1.6. Лабораторная работа №6. Совместная работа последовательно соединенных насосов, имеющих разные характеристики

Цель лабораторной работы.

Формирование умения анализировать последовательную работу двух разных центробежных насосов.

Задание.

Исследовать особенности совместной работы последовательно соединенных центробежных насосов, имеющих разные характеристики. Изучить построение суммарной характеристики насосов.

Последовательное соединение насосов с разными характеристиками находит частое применение на практике. При увеличении совместной подачи может возникнуть ситуация, когда напор одного (менее производительного) из насосов станет равным нулю. Эта точка называется *критической*.



Рисунок. 7. Последовательная работа насосов с разными характеристиками

При этом существует опасность выхода насосов из строя при работе в области характеристики, находящейся за критической точкой. Построение совместной характеристики последовательно работающих разных насосов аналогично построению совместной характеристики одинаковых насосов.

Методические указания по выполнению работы

1. Построение характеристик каждого насоса, работающего отдельно. Для обеспечения насосами разных характеристик необходимо установить на насосе Wilo-TOP-S максимальное число оборотов, а на насосе Wilo-Stratos MAXO – 1260 об/мин.

Результаты замеров заносятся в табл. 6. По результатам замеров и необходимых расчетов на одном графике строятся рабочие характеристики $H = f(Q)$ каждого насоса, работающего в отдельности.

Допускается использовать характеристику насоса Wilo-TOP-S, полученную в лабораторной работе №1.

2. Построение суммарной характеристики (практической) двух последовательно работающих насосов по результатам лабораторных измерений. При последовательном включении насосов весь расход жидкости последовательно проходит через каждый из нагнетателей. Для этого необходимо закрыть краны 11, 14 и открыть краны 12, 13, 17. Давление на выходе из установки определяется манометром 8, на входе – манометром 9.

Расчет напора следует проводить по формуле (13).

3. Используя данные первого этапа, строится теоретическая суммарная характеристика двух последовательно соединенных насосов (на том же графике). Для построения суммарной характеристики последовательно работающих насосов выбирают ряд значений расхода воды в сети. Складывая для каждого из выбранных расходов соответствующие значения напоров, развиваемых каждым насосом в отдельности, получаем ряд точек суммарной характеристики. Соединяя полученные точки плавной линией, получаем суммарную характеристику. Теоретическое построение совместной характеристики разных насосов проводится до критической точки.

4. Сравнение суммарных характеристик, полученных на втором и третьем этапах. Анализ совместной работы насосов за критической точкой.

Таблица 6

Опытные и расчетные данные

Наименование величин	Обозначение	Размерность	Положение регулирующего органа							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1 этап										
<i>Насос №1 при 1260 об/мин</i>										
Производительность	Q_1	м ³ /ч								
Напор	H_1	м								
<i>Насос №2</i>										
Производительность	Q_2	м ³ /ч								
Напор	H_2	м								
2 этап										

Производительность при последовательно работающих насосах	Q	м ³ /ч									
Напор при последовательно работающих насосах	H	м									

Контрольные вопросы

1. Что понимают под «критической точкой» при последовательном соединении насосов, имеющих разные характеристики?
2. Чем отличается методика построения совместной характеристики разных насосов от применяемой методики для одинаковых насосов?
3. Приведите пример системы (в области ТГСиВ, ВиВ), в которой применяется последовательное соединение насосов с разными характеристиками.

1.7. Лабораторная работа №7. Работа электронного циркуляционного насоса в режиме $\Delta p = \text{const}$

Цель лабораторной работы.

Формирование умения анализировать работу насоса в режиме $\Delta p = \text{const}$.

Задание.

Исследовать особенности работы электронного циркуляционного насоса для систем отопления в режиме поддержания постоянного перепада давления $\Delta p = \text{const}$.

Режим поддержания постоянного перепада давления широко используется во всех типах систем отопления, оборудованных термостатическими клапанами. При работе насоса в указанном режиме происходит экономия потребляемой насосом электроэнергии и исключается возможность появления шумов в элементах системы.

Методические указания по выполнению работы

1. Исследование режима $\Delta p = \text{const}$ производится на насосе Wilo-Stratos MAHO. Второй насос должен быть отключен. На дисплее насоса Wilo-Stratos MAHO задать режим $\Delta p = \text{const}$ и установить величину поддерживаемого напора – 6 м (в соответствии с Инструкцией по монтажу и эксплуатации).

2. Произвести запуск насоса 1 при закрытом кране 12 на напорном трубопроводе и открытом кране 11 на всасывающем трубопроводе. Второй насос при этом должен быть отключен от системы при помощи запорной арматуры на всасывающем и напорном трубопроводах (краны 13, 14 и 17 закрыты). Регулятор расхода 3 в полностью открытом положении.

3. Полностью открыть кран 12. Провести измерения: расхода жидкости расходомером 4; давления перед насосом манометром 7; давления после насоса манометром 8; мощности, потребляемой электродвигателем, ваттметром 18.

4. Уменьшая расход жидкости от максимального до нулевого путем постепенного закрытия регулятора расхода 3, провести все измерения минимум 8 раз. Между каждым изменением сопротивления сети и проведением замеров необходимо выдерживать паузу 90 с, необходимую для адаптации электронного насоса к изменившимся внешним условиям.

5. Опытные и расчетные данные занести в табл. 7.

6. На основании экспериментальных и расчетных данных построить характеристики электронного насоса для режима $\Delta p = \text{const}$: $H = f(Q)$, $P_1 = f(Q)$, КПД = $f(Q)$.

7. Сравнить полученные характеристики с данными каталога, построив их на одном графике.

Таблица 7

Опытные и расчетные данные

Наименование величин	Обозначение	Размерность	Положение регулирующего органа										
			1	2	3	4	5	6	7	8			
Производительность насоса	Q	м ³ /ч											
Давление на всасывании	$p_{ст1}$	Па											
Давление на нагнетании	$p_{ст2}$	Па											
Напор, создаваемый насосом	H	м											
Полезная мощность насоса	$N_{пол}$	Вт											
Мощность, потребляемая из электросети	P_1	Вт											
КПД насоса	КПД	–											

Контрольные вопросы

1. Чем отличается электронный насос от стандартного?
2. Какие режимы работы применяются в циркуляционных электронных насосах для систем отопления?
3. При каком режиме происходит меньшее потребление электроэнергии насосом: $\Delta p = \text{const}$ или $\Delta p = \text{variable}$?

1.8. Лабораторная работа №8. Работа электронного циркуляционного насоса в режиме $\Delta p = \text{variable}$

Цель лабораторной работы.

Формирование умения анализировать работу насоса в режиме $\Delta p = \text{variable}$.

Задание.

Исследовать особенности работы электронного циркуляционного насоса для систем отопления в режиме поддержания переменного перепада давления $\Delta p = \text{variable}$.

Режим поддержания переменного перепада давления $\Delta p = v$ широко используется во всех типах систем отопления, оборудованных термостатическими клапанами. При работе насоса в указанном режиме происходит дополнительная экономия потребляемой насосом электроэнергии относительно режима $\Delta p = c$ и исключается возможность появления шумов при глубоком регулировании.

Методические указания по выполнению работы

1. Исследование режима $\Delta p = \text{variable}$ производится на насосе Wilo-Stratos MAHO. Второй насос должен быть отключен. На дисплее насоса Wilo-Stratos MAHO задать режим $\Delta p = \text{variable}$ и установить величину поддерживаемого напора – 6 м (в соответствии с Инструкцией по монтажу и эксплуатации).

2. Произвести запуск насоса 1 при закрытом кране 12 на напорном трубопроводе и открытом кране 11 на всасывающем трубопроводе. Второй насос при этом должен быть отключен от системы при помощи запорной арматуры на всасывающем и напорном трубопроводах (краны 13, 14 и 17 закрыты). Регулятор расхода 3 в полностью открытом положении.

3. Полностью открыть кран 12. Провести измерения: расхода жидкости расходомером 4; давления перед насосом манометром 7; давления после насоса манометром 8; мощности, потребляемой электродвигателем, ваттметром 18.

4. Уменьшая расход жидкости от максимального до нулевого путем постепенного закрытия регулятора расхода 3, провести все измерения минимум 8 раз. Между каждым изменением сопротивления сети и проведением замеров необходимо выдерживать паузу 90 с, необходимую для адаптации электронного насоса к изменившимся внешним условиям.

5. Опытные и расчетные данные занести в табл. 8.

6. На основании экспериментальных и расчетных данных построить характеристики электронного насоса для режима $\Delta p = \text{variable}$: $H = f(Q)$, $P_1 = f(Q)$, КПД = $f(Q)$.

7. Сравнить полученные характеристики с данными каталога, построив их на одном графике.

Таблица 8

Опытные и расчетные данные

Наименование величин	Обозначение	Размерность	Положение регулирующего органа							
			1	2	3	4	5	6	7	8

Производительность насоса	Q	м ³ /ч								
Давление на всасывании	$p_{ст1}$	Па								
Давление на нагнетании	$p_{ст2}$	Па								
Напор, создаваемый насосом	H	м								
Полезная мощность насоса	$N_{пол}$	Вт								
Мощность, потребляемая из электросети	P_1	Вт								
КПД насоса	КПД	–								

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются режимы $\Delta p = \text{const}$ и $\Delta p = \text{variable}$?
2. В каких случаях целесообразно выбирать тот или иной режим регулирования ($\Delta p = \text{const}$ или $\Delta p = \text{variable}$)?
3. Если при настройке насоса в режиме $\Delta p = \text{variable}$ задать напор 6 м, какой напор будет поддерживать насос при нулевой подаче?

2. ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ ВЕНТИЛЯТОРЫ. ОПИСАНИЕ СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

У центробежных вентиляторов при стандартных условиях следующие величины: расход Q , напор P , мощность N и коэффициент полезного действия η связаны между собой, изменение одной из них вызывает изменение остальных. Зависимость между этими величинами можно представить либо в виде таблиц, либо в графической форме. Обычно характеристики строят в виде зависимостей:

$$P = f_1(Q), N = f_2(Q), \eta = f_3(Q).$$

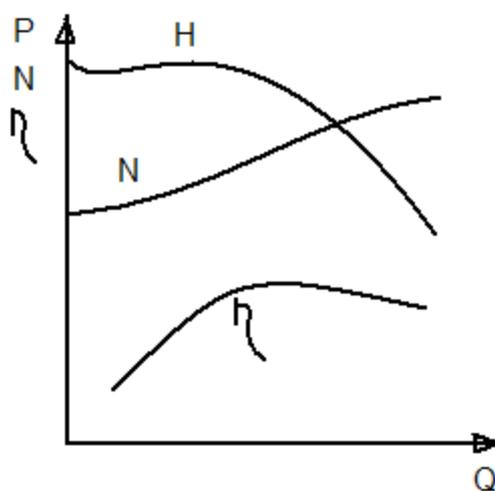


Рисунок. 8. Характеристики центробежного вентилятора.

На основании только теоретических расчётов эти характеристики вентилятора с высокой точностью построить нельзя. Поэтому на практике применяют такие, которые получены опытным путём. Типичные характеристики центробежного вентилятора в виде указанных зависимостей представлены на рис. 8. Они служат для исследования работы вентилятора в различных условиях и для проектирования вентиляторных установок.

Объект испытаний – одноступенчатый центробежный вентилятор марки Casals MB 25/10 T2 4. Его рабочее колесо с загнутыми вперёд лопатками насажено на конец вала фланцевого электродвигателя переменного тока, прикреплённого к корпусу вентилятора.

Техническая характеристика вентилятора:

Диаметр рабочего колеса: $D_2 = 288$ мм

Частота вращения: $n = 2880-3000$ мин⁻¹

Расчётный расход воздуха: $Q_{\text{расч}} = 1400$ м³/ч

Расчётный напор: $P_{\text{расч}} = 2100$ Па

Установленная мощность электродвигателя: $N = 4$ кВт

На рис. 9 представлена схема стенда для испытаний центробежного вентилятора и указаны контролируемые параметры, места измерений и измерительные приборы.

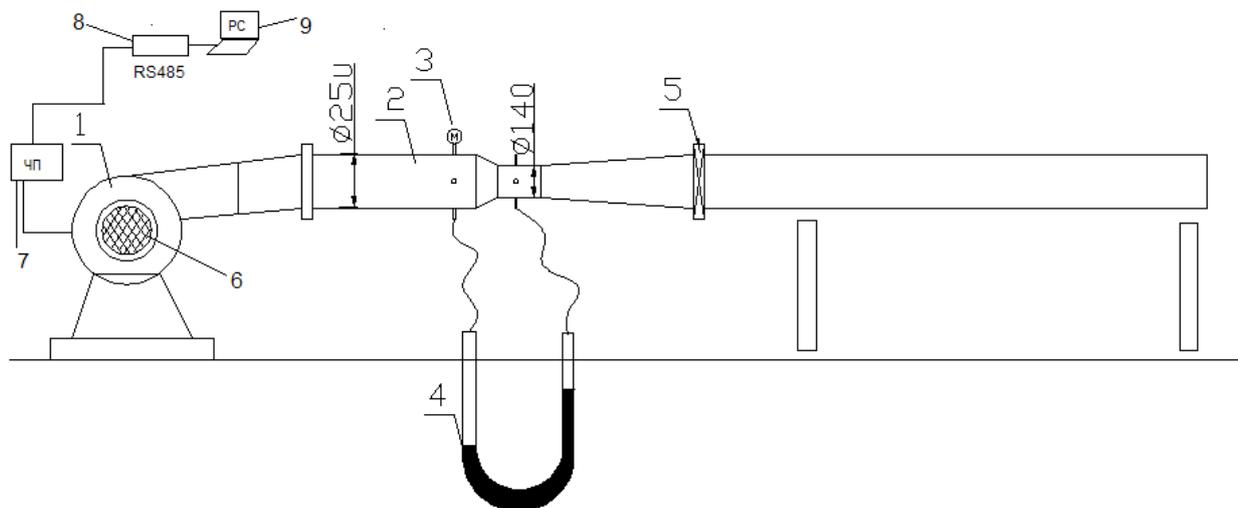


Рисунок. 9. Схема стенда для испытаний центробежного вентилятора

В работающей установке воздух всасывается вентилятором через решётку 6 круглого сечения и затем через конфузорный всасывающий патрубок поступает к рабочему колесу.

Воздух, сжатый в рабочем колесе 1 и спиральном кожухе, выходит из вентилятора через нагнетательный трубопровод 2, на котором установлен ирисовый демпфер Systemair SPM 250 (рис. 10) в качестве дроселирующей заслонки, предназначенной для регулирования расхода воздуха.



Рисунок. 10. Ирисовый демпфер Systemair SPM 250

Привод заслонки ручной. Нагнетательный трубопровод с проходным сечением $D=250$ мм переходит в трубу Вентури (рис. 11), используемую в качестве расходомера. Напор и перепад давлений в трубе Вентури измеряются соответственно манометром 3 и дифманометром 4.

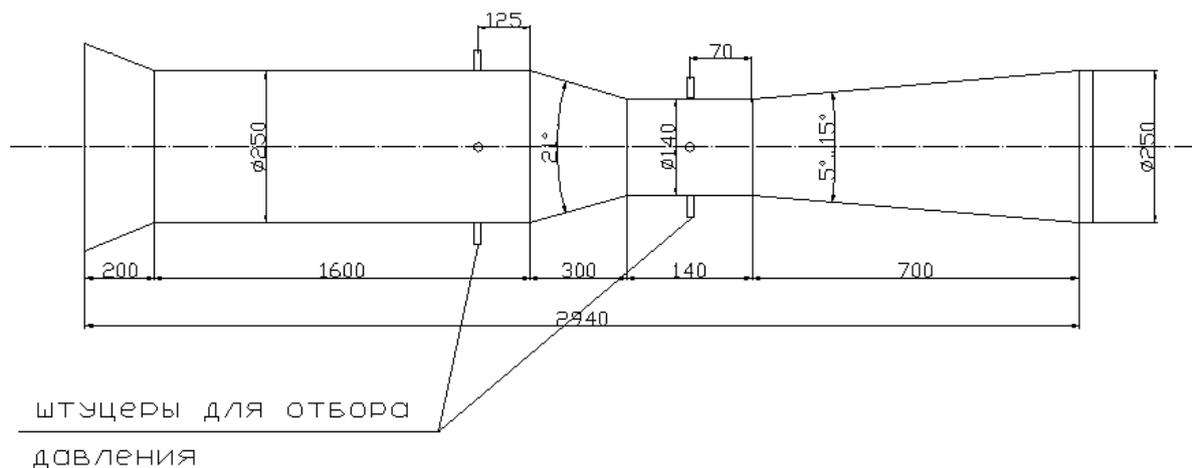


Рисунок. 11. Труба Вентури

Напор (разрежение) в центре рабочего колеса замеряется электронным дифманометром Testo 510. Частота вращения ротора, напряжение, сила тока измеряются частотным преобразователем INVERTEK OPTIDRIVE E2 с использованием компьютера, фирменного программного обеспечения и конвертера USB/RS-485. Барометрическое давление определяется по барометру.

Электрическая мощность $N_{эл}$ двигателя определяется путём снятия показаний по току с компьютера, напряжения – с частотного преобразователя и расчёту по формуле (14):

$$N_{эл} = \sqrt{3} \cdot U \cdot J \cdot \cos \varphi, \quad (14)$$

где U - напряжение, В; J – сила тока, А; $\cos \varphi = 0,87$ - принят с таблички двигателя.

2.1. Лабораторная работа №9. Получение характеристик центробежного вентилятора с использованием дросселирования

Цель лабораторной работы.

Формирование умения проведения испытания центробежного вентилятора.

Задание.

Ознакомиться с методикой испытаний центробежного вентилятора, а также с порядком обработки полученных экспериментальных данных и построением рабочих характеристик вентилятора.

Для получения экспериментальных характеристик вентилятор необходимо испытать на различных режимах работы. С этой целью проводится серия измерений (7-8) при постоянной частоте вращения ($n = 3000 \text{ мин}^{-1}$), но при разных сопротивлениях дроссельной заслонки 5 (рис. 9). Для равномерного распределения на графике $P = f_1(Q)$ экспериментальных точек желательно при

переходе с режима на режим изменять расход на равную величину. При этом перепад давлений на дифманометре 4 будет изменяться. Изменением температуры воздуха до и после вентилятора в данной работе пренебрегаем.

Измерения проводятся только после стабилизации всех контролируемых параметров, т.е. в установившемся режиме работы. В процессе испытаний режим меняют 7-8 раз, причём в каждом режиме измеряются все контролируемые параметры установки, перечень которых приведён в табл. 9.

Таблица 9

Протокол испытаний

Измеряемый параметр	1	2	3	4	5	6	7	8
h_1 – уровень воды в левой трубке дифманометра, мм в. ст.								
h_2 – уровень воды в правой трубке дифманометра, мм в. ст.								
Давление перед сужением. Стрелочный манометр 3, P_{cm2} , (М) Па								
Разрежение в центре рабочего колеса. Электронный дифманометр, P_{cm1} , Па.								
Потребляемый ток I , А. Из программы управления.								
Напряжение U , В. Из программы управления.								

Методические указания по выполнению работы.

Ознакомившись с описанием работы, студенты должны осмотреть всю установку, обратив особое внимание на контрольно-измерительные приборы и арматуру. Приготовить «Протокол испытаний» для записи результатов измерений.

До начала испытаний распределить рабочие места:

- 1 – у пускового устройства – компьютера;
- 2 и 3 – у дифманометра 4;
- 4 и 5 – у манометра 3;
- 6 и 7 – у вентилятора;
- 8 и 9 – у заслонки 5.

Проверить готовность каждого рабочего места:

- подготовить к работе переносной электронный микроманометр;
- поверить показания приборов при выключенной установке;
- получить термометр для измерения температуры воздуха в помещении;
- полностью закрыть заслонку 5.

Под руководством преподавателя запустить установку из программы на компьютере.

При испытании все замеры выполняются по команде, подаваемой студентом у дифманометра 4.

Переход на следующий режим осуществляется поворотом дроссельной заслонки таким образом, чтобы расход газа через вентилятор изменялся от режима к режиму по возможности на одинаковое значение.

После снятия показаний при полностью открытой заслонке необходимо её полностью закрыть и выключить электродвигатель.

По окончании испытаний студенты сверяют свои записи и приступают к расчётам и построению графиков.

После построения зависимости $Q-P$ производится сравнительный анализ кривой с данными завода – изготовителя.

Обработка результатов эксперимента.

Схема трубы Вентури представлена на рис. 12.

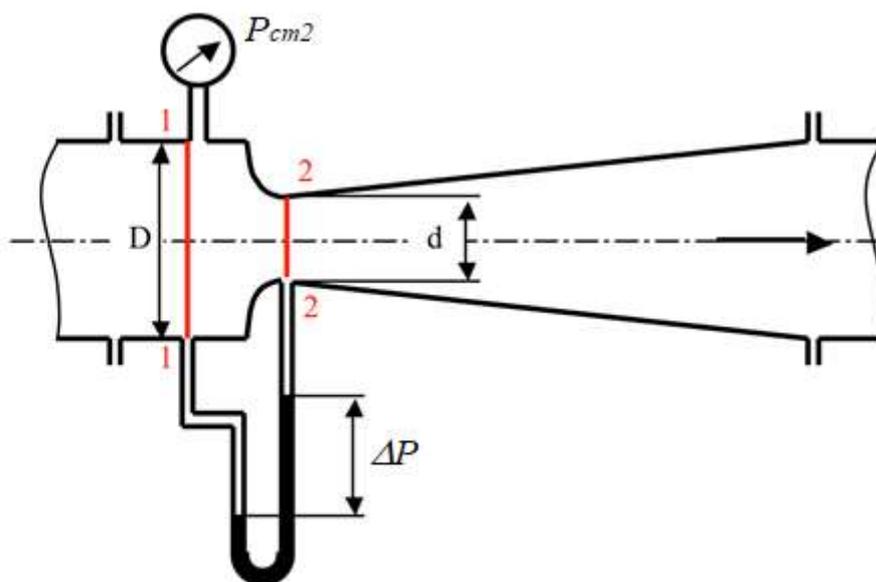


Рисунок. 12. Схема трубы Вентури с геометрическими и измеряемыми параметрами

$d = 0,14$ м – диаметр горловины трубы Вентури.

$D = 0,25$ м – диаметр основного трубопровода.

$t = 21,3$ °С – температура воздуха – измеряется внешним термометром.

$\mu = 1$ – коэффициент расхода.

$R = 287$ Дж/(кг·К) – универсальная газовая постоянная.

$P_{атм} = 757$ мм рт. ст. – атмосферное давление – измеряется барометром.

Для подстановки в формулы перевести в Па, умножив на 133,322.

$\rho_{воды} = 998,2$ кг/м³ – принимаем постоянным ввиду малости отклонений температуры внутри лаборатории от 20 °С.

Плотность воздуха, кг/м³, определяем по формуле

$$\rho = \frac{P_{ст2} + p_{атм}}{R(273 + t)} \quad (15)$$

Перепад давления ΔP , Па, на дифманометре определяем по формуле

$$\Delta P = (\rho_{\text{воды}} - \rho)gh, \quad (16)$$

где $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;
 $h = h_2 - h_1$ - разность уровней в плечах дифманометра, мм в. ст.

Составим уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2 (без коэффициентов сопротивления, так как $\mu = 1$):

$$\frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} = \frac{v^2}{2g},$$

где V и v – скорости в сечениях D и d соответственно, м/с.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \left(\frac{d}{D}\right)^4 &= \frac{v^2}{2g} \\ \frac{\Delta P}{\rho g} &= \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right] \frac{v^2}{2g} \end{aligned}$$

Отсюда найдем скорость движения воздуха в сечении 2-2, м/с:

$$v = \sqrt{\frac{2 \frac{\Delta P}{\rho}}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \quad (17)$$

Расход воздуха, м³/ч, определим по формуле

$$Q = 3600v \frac{\pi d^2}{4} \quad (18)$$

Для построения графиков расчёты сведём в табл. 10.

Полный измеренный напор вентилятора определяется по формуле:

$$P_{\text{изм}} = (P_{\text{ст2}} + P_{\text{д2}}) - (P_{\text{ст1}} + P_{\text{д1}}), \quad (19)$$

где $P_{\text{д1}}$ и $P_{\text{д2}}$ – динамические напоры на всасывании и нагнетании, Па, которые определяем расчётом по формуле:

$$P_{\text{д}} = \rho \cdot \frac{V^2}{2}, \quad (20)$$

где V - скорость воздуха, м/с, определяемая по формуле:

$$V = \frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot D^2}, \quad (21)$$

где D – диаметр рассматриваемого трубопровода, м;

Q – расход воздуха, м³/с;

$P_{\text{ст1}}$ - статическое давление, измеренное электронным дифманометром в центре рабочего колеса (разрежение – со знаком «минус»).

Необходимо в формуле (19) учитывать отрицательный знак статического напора $P_{ст1}$ на всасывании. Характеристики и табличные данные, помещаемые в каталогах вентиляторов, приводятся к стандартным атмосферным условиям: $P_0 = 101325 \text{ Па}$, $T_0 = 293,15 \text{ К}$, относительная влажность $\varphi = 50\%$. В этих условиях плотность воздуха $\rho_0 = 1,2041 \text{ кг/м}^3$.

Пересчёт напоров на стандартные условия выполним по формуле:

$$P = P_{изм} \cdot \frac{101325 \cdot (273,15+t)}{293,15 \cdot P_6}, \quad (22)$$

где P – измеренное полное давление, приведённое к стандартным условиям воздуха, Па;

$P_{изм}$ – измеренное давление, определённое по (19);

P_6 – измеренное барометрическое давление, Па;

t – температура воздуха, °С.

Мощность на валу вентилятора N_B определим по формуле:

$$N_B = N_{эл} \cdot \eta_э \cdot \eta_{п}, \quad (23)$$

где $\eta_э$ – КПД электродвигателя, определяемое из дополнительной литературы.

Для нашего случая $\eta_э = 0,83$;

$\eta_{п}$ – КПД передачи. Поскольку в нашем случае рабочее колесо жёстко соединено с валом двигателя, то $\eta_{п} = 1$;

$N_{эл}$ – электрическая мощность, определённая по (14).

КПД вентилятора определим по формуле:

$$\eta = \frac{Q \cdot P}{N_B} \quad (24)$$

Таблица 10

Данные для построения графиков

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8
Измеренные параметры								
$P_{см2}$	1750	1700	1650	1960	1850	1630	1450	1200
h_1 (левая трубка), мм в. ст.	190	185	172	130	109	67	43	15
h_2 (правая трубка), мм в. ст.	190	195	207	240	268	308	331	380
$P_{см1}$, Па. Разрежение в центре рабочего колеса	-105	-125	-138	-207	-340	-460	-550	-623
Потребляемый ток I , А	2,6	2,8	3,4	5,1	6,1	7,6	8,4	9
Напряжение U , В	379	379	380	380	380	380	380	380
Расчёт расхода воздуха								

$h = h_2 - h_1$, ММ В. СТ.	0	10	35	110	159	241	288	365
$\rho = \frac{P_{ст2} + P_{атм}}{R(273+t)}$, КГ/М ³	1,2156	1,2150	1,2144	1,2181	1,2168	1,2142	1,2121	1,2091
$\Delta P = (\rho_{воды} - \rho)gh$, Па (h переводим в м)	0,00	97,77	342,20	1075,48	1554,55	2356,28	2815,81	3568,66
$v = \sqrt{\frac{2 \frac{p}{\rho}}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}}$, М/С	0,00	13,36	25,00	44,25	53,23	65,61	71,79	80,91
$Q = 3600v \frac{\pi d^2}{4}$, М ³ /Ч	0,00	740,39	1385,47	2452,47	2950,11	3635,92	3978,18	4484,01
$Q = v \frac{\pi d^2}{4}$, М ³ /С	0,0000	0,2057	0,3849	0,6812	0,8195	1,0100	1,1050	1,2456
Расчёт полного напора вентилятора								
$V_2 = \frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot 0.25^2}$, М/С	0,00	4,19	7,84	13,88	16,69	20,58	22,51	25,37
$V_1 = \frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot 0.203^2}$, М/С	0,00	6,35	11,89	21,05	25,32	31,21	34,14	38,48
$P_{д2} = \rho \cdot \frac{V_2^2}{2}$, Па	0,0	10,7	37,3	117,3	169,6	257,0	307,1	389,2
$P_{д1} = \rho \cdot \frac{V_1^2}{2}$, Па	0,0	24,5	85,9	269,8	390,0	591,2	706,5	895,3
$P_{изм 2} = P_{ст2} + P_{д2}$, Па	1750	1711	1687	2077	2020	1887	1757	1589
$P_{изм 1} = P_{ст1} + P_{д1}$, Па	-105,0	-100,5	-52,1	62,8	50,0	131,2	156,5	272,3
$P = (P_{изм 2} - P_{изм 1}) \cdot \frac{101325 \cdot (273+t)}{293 \cdot P_{атм}}$, Па	1871	1826	1754	2031	1986	1771	1614	1328
Расчёт мощности								
$N_{эл} = \sqrt{3} \cdot U \cdot J \cdot \cos \varphi$, Вт	1484,8	1599,1	1946,8	2920,3	3492,9	4351,8	4809,8	5153,4
$N_{в} = N_{эл} \cdot \eta_{э} \cdot \eta_{п}$, Вт	1232	1327	1616	2424	2899	3612	3992	4277
Расчёт КПД								

$\eta = \frac{Q \cdot P}{N_B}$	0,00	0,28	0,42	0,57	0,56	0,50	0,45	0,39
--------------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------

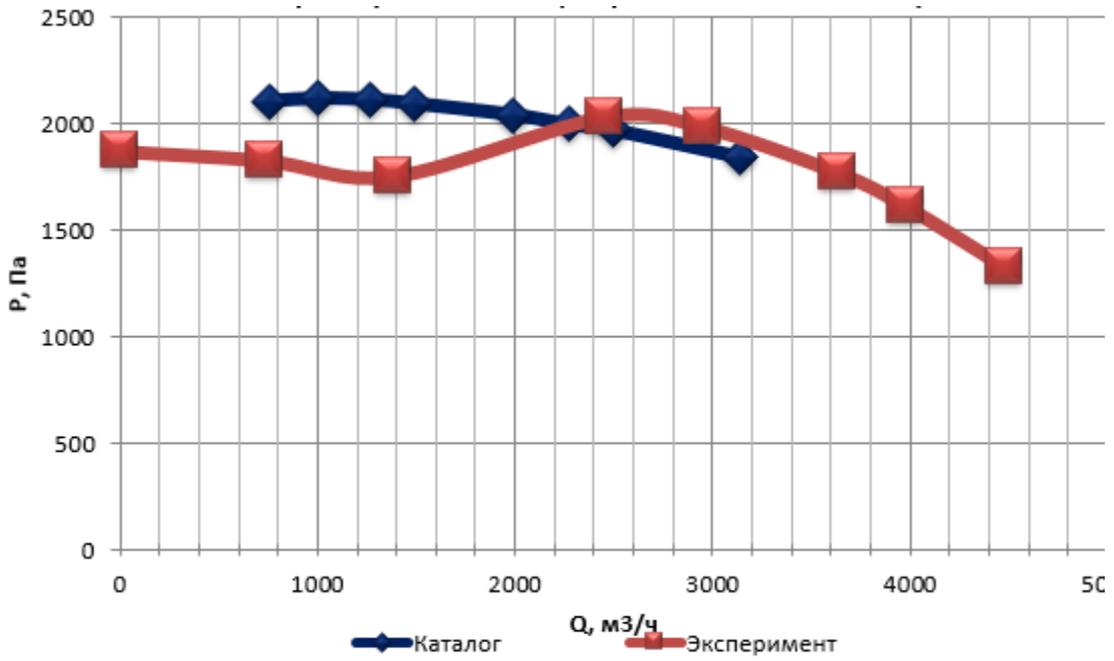


Рисунок. 13. Сравнение экспериментальной кривой $P=f(Q)$

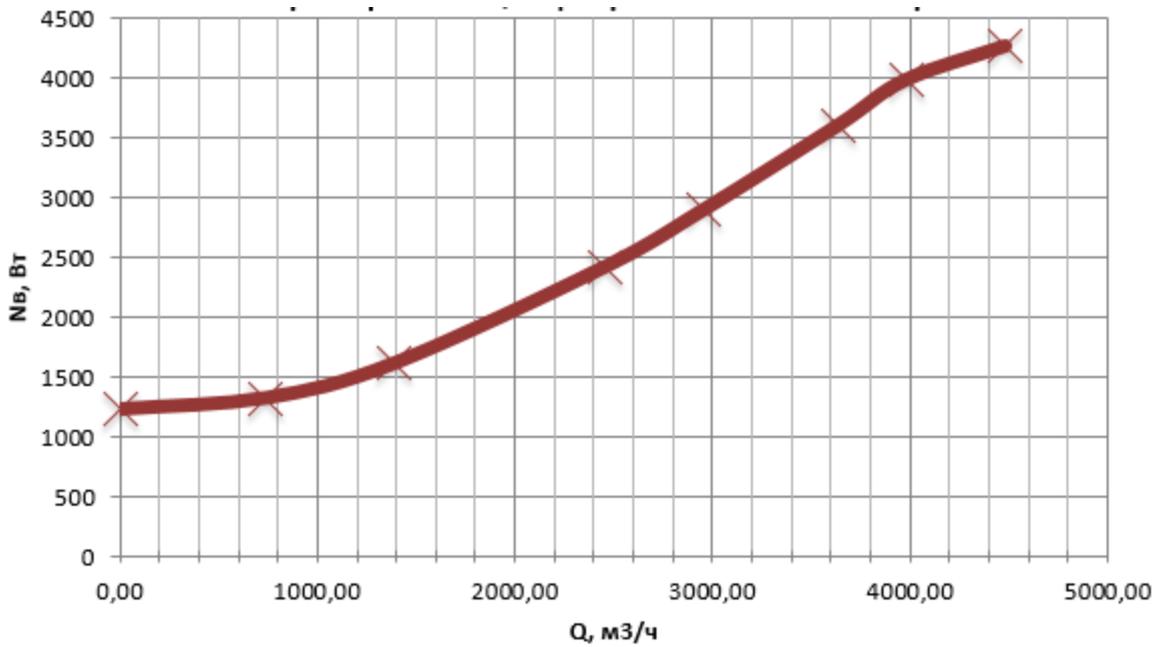


Рисунок. 14. Экспериментальная зависимость мощности на валу от расхода $N_в=f(Q)$

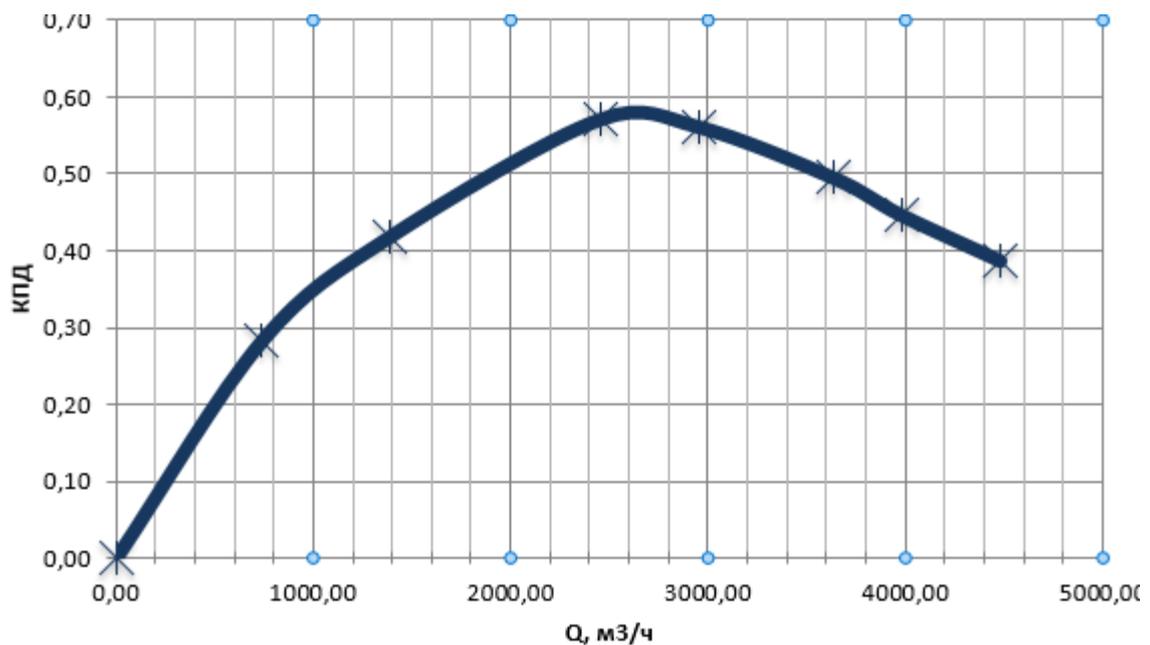


Рисунок. 15. Экспериментальная зависимость КПД от расхода $\eta=f(Q)$

Построим номограмму для определения расхода воздуха по показаниям дифманометра. Данная номограмма может быть использована для оперативного регулирования подачи вентилятора. Колебания температуры воздуха и атмосферного давления влияют на диаграмму, однако ввиду незначительности этих колебаний можем ими пренебречь.

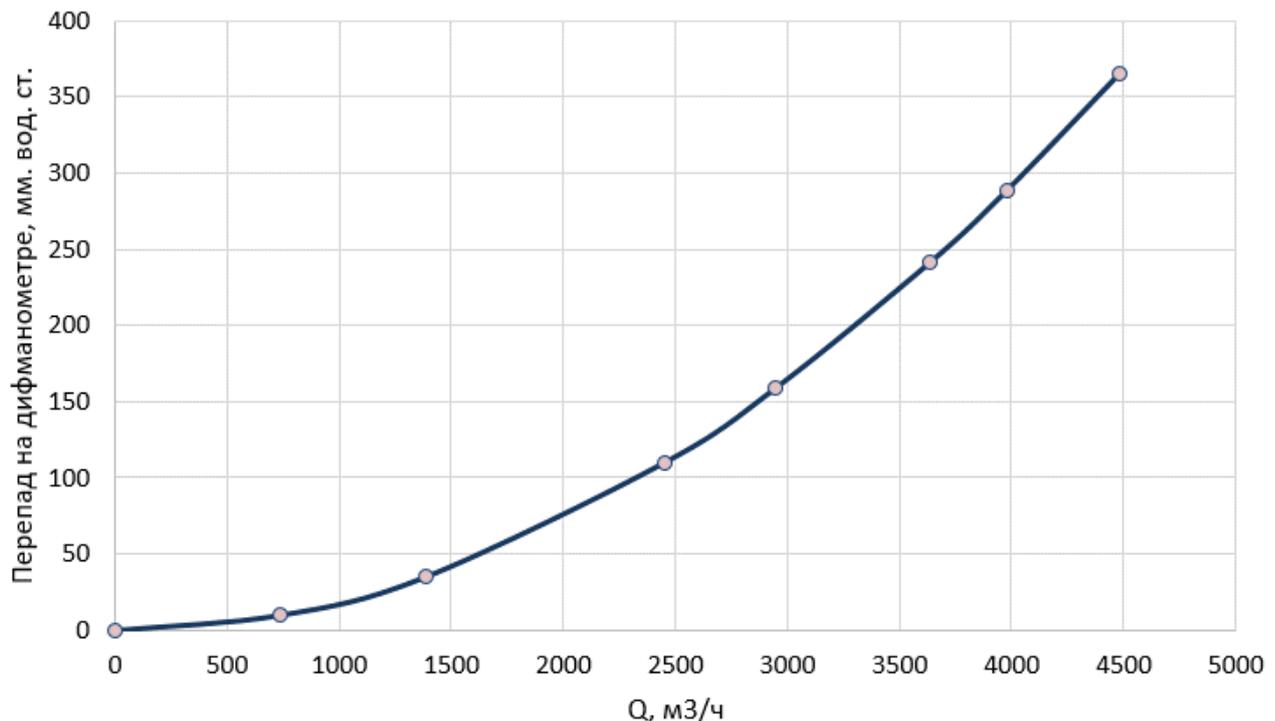


Рисунок. 16. Номограмма для определения расхода воздуха по показаниям дифманометра

Заключение.

1. Для промышленных нужд при использовании расходомеров с сужающими устройствами применяют методику обработки экспериментальных данных, приведённую в [1]. Она учитывает ряд физических тонкостей, вводит дополнительные поправки, но сложнее для понимания. Для учебных и «бытовых» целей методики, описанной выше [2], вполне достаточно.

2. Точность графиков, приведённых в данном пособии, не претендует на абсолютную достоверность, так как построены по экспериментальным данным реальной лабораторной работы, выполненной студентами. Не исключены ошибки измерений.

2.2. Лабораторная работа №10. Получение характеристик центробежного вентилятора с использованием вариации частотой вращения

Цель лабораторной работы.

Формирование умения проведения испытания центробежного вентилятора.

Задание.

Ознакомиться с методикой регулирования центробежного вентилятора изменением частоты вращения рабочего колеса, а также с порядком обработки полученных экспериментальных данных и построением рабочих характеристик вентилятора.

Повторим серию измерений, описанную в лабораторной работе №9, но используя вариацию частотой вращения двигателя при полностью открытой дроссельной заслонке 5 (рис. 9). Для серии экспериментов заполнить ведомость результатов, используя методику расчёта, приведённую в лабораторной работе №9 (табл. 10). По данным табл. 10 построить графики $P=f(Q)$, $N_e=f(Q)$, $\eta=f(Q)$.

2.3. Лабораторная работа №11. Сравнение экономической эффективности способов регулирования центробежного вентилятора

Цель лабораторной работы.

Формирование умения анализировать эффективность методов регулирования центробежного вентилятора.

Задание.

Сравнить два способа регулирования вентилятора: дросселированием и изменением частоты вращения. Выявить наиболее эффективный способ.

В лабораторных работах № 9, 10 мы познакомились с двумя способами регулирования центробежных вентиляторов: дросселированием и изменением частоты вращения. Оценим финансовые затраты за первые пять лет эксплуатации системы с каждым из способов регулирования.

Затраты за жизненный цикл с точки зрения эксплуатации насоса или насосной установки рассчитываются на основании определения различных вариантов годовых эксплуатационных затрат, процентов и амортизации стоимости установки, например, машинной установки или здания. Наибольшую долю затрат за жизненный цикл центробежных насосов составляют затраты на энергию, эксплуатационные затраты и расходы на обслуживание см. рис. 17.

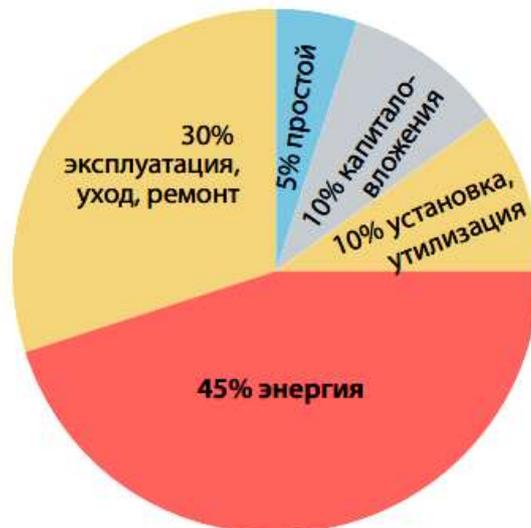


Рисунок. 17. Распределение затрат за жизненный цикл центробежного нагнетателя [3]

Все затраты, кроме электроэнергии и капиталовложений, для обоих вариантов регулирования идентичны и не учитывались.

Условия работы вентилятора – круглосуточно. Распределение подачи по часам суток представлена в табл. 11.

Таблица 11

Распределение подачи вентилятора по часам суток

Часы суток	%, Q_{max}
1	50%
2	50%
3	50%
4	50%
5	50%
6	50%
7	50%
8	50%
9	50%
10	100%
11	100%
12	100%
13	100%
14	100%
15	100%
16	100%
17	100%

18	100%
19	70%
20	70%
21	70%
22	70%
23	70%
24	70%

В данной работе нужно решить обратную задачу: зная требуемый расход воздуха вычислить соответствующий перепад жидкости в дифманометре, затем регулированием обеспечить этот перепад. Результаты вычислений сведём в табл. 12.

Таблица 12

Исходные данные и результаты вычислений

Способ регулирования	Изменение частоты вращения			Дросселирование			Примечание
	100%	70%	50%	100%	70%	50%	
% подачи	100%	70%	50%	100%	70%	50%	
Q , м ³ /ч	$Q_{max} = 4487$	3139	2242	4487	3139	2242	
h , мм вод. ст. – требуемые показания дифманометра для создания соответствующего расхода Q .	365	179	91	365	179	91	Определяем по номограмме (рис. 16) или подбором параметра Excell
Потребляемый ток I , А	9,4	4,7	2,9	9,4	6,3	4,6	С частотного преобразователя
Напряжение U , В	380	280	197	380	380	380	С частотного преобразователя
Число оборотов n , об/мин	3000	2150	1560	n=const=3000			С частотного преобразователя
$N_{эл} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$, Вт	5383	1983	861	5383	3607	2634	
Тариф электроэнергии, руб/(кВт·ч)	4,36						
Время работы на режиме, ч	9	6	9	9	6	9	
Стоимость в год, руб.	77093	18935	12330	77093	34446	37726	
Итого при круглосуточной работе, руб.	108358			149265			
Стоимость регулирующего	30000			1300			

оборудования, монтажа, наладки руб.			
Общие затраты по годам, руб.			
1	138358	150565	
2	108358	149265	
3	108358	149265	
4	108358	149265	
5	108358	149265	

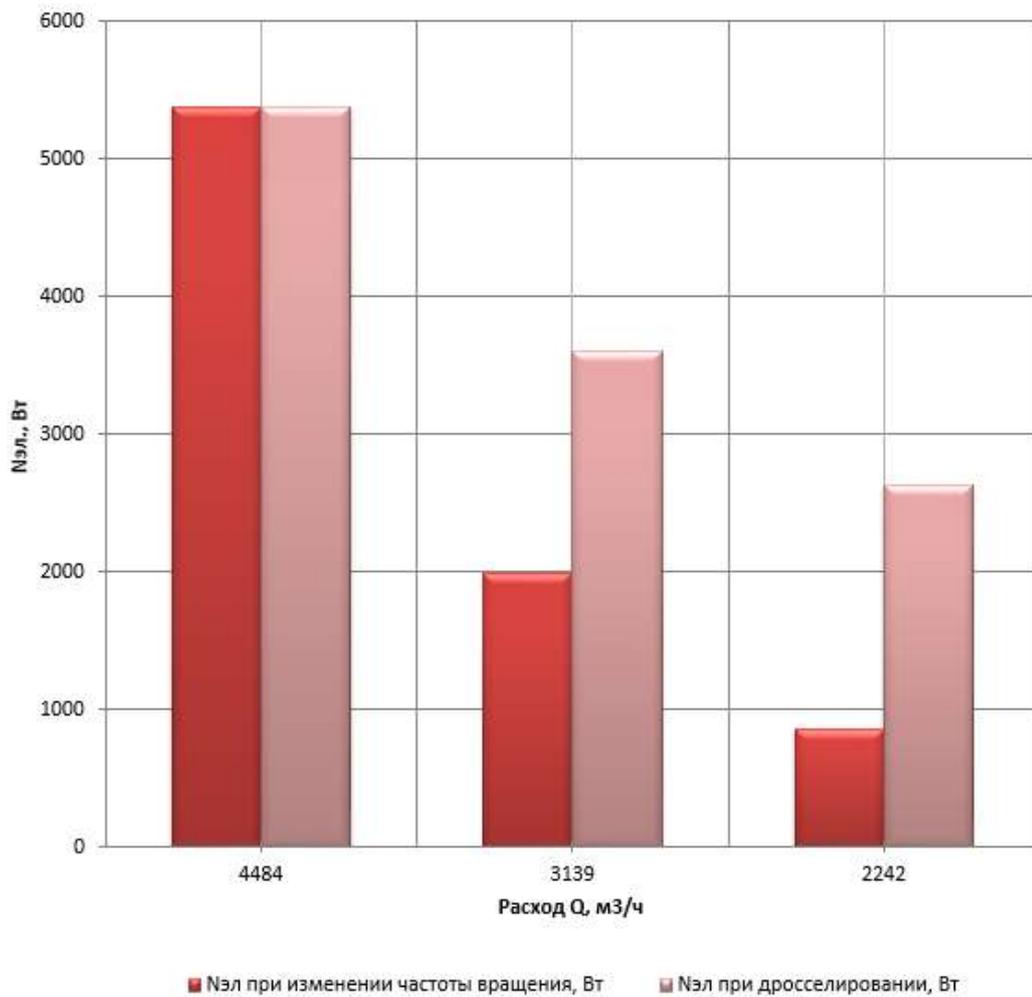


Рисунок. 18. Потребляемая мощность центробежного вентилятора при различных способах регулирования



Рисунок. 19. Разность годовых затрат на электроэнергию при различных способах регулирования

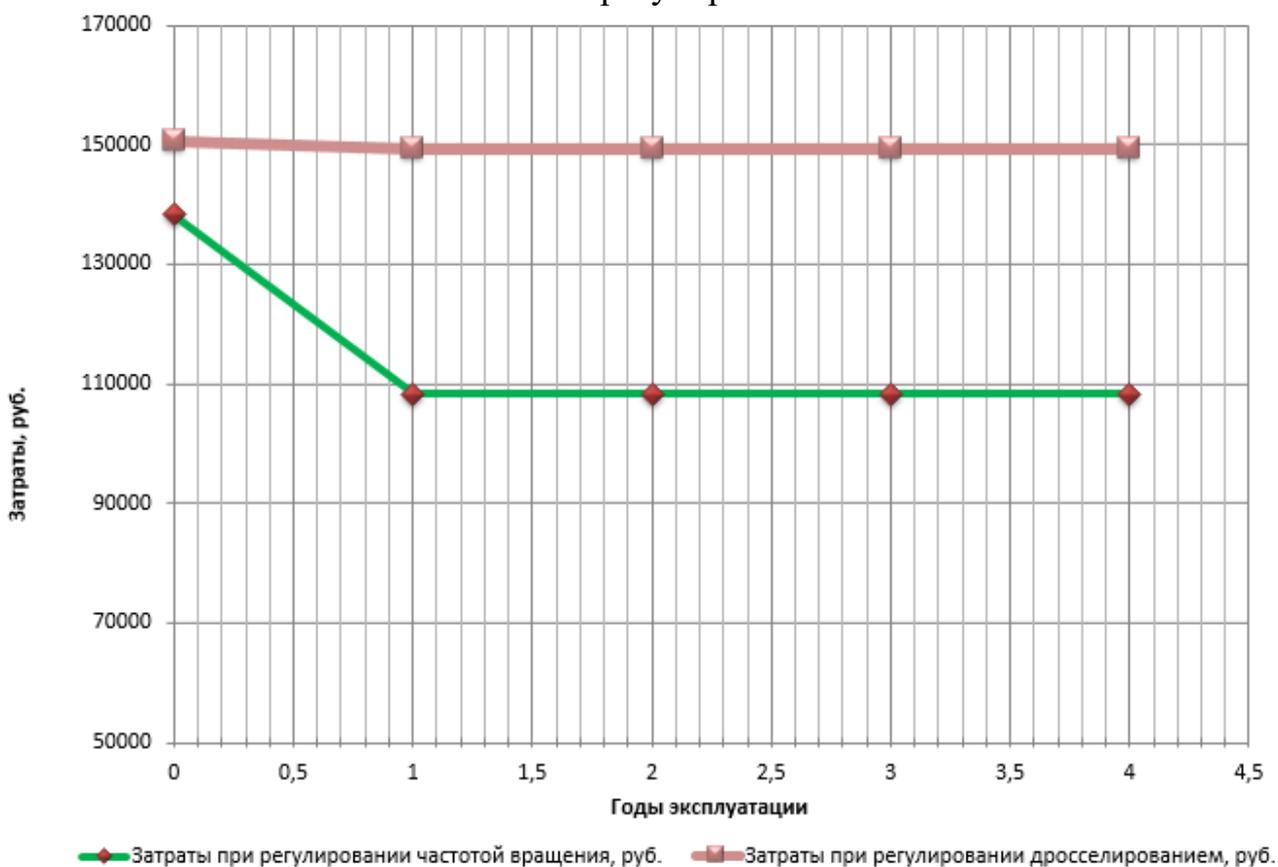


Рисунок. 20. Общие затраты по годам эксплуатации

Вывод: практический эксперимент в лабораторных условиях подтверждает экономическую эффективность частотного регулирования.

2.4. Лабораторная работа №12. Апробация теоретических законов пропорциональных режимов работы центробежных машин

Цель лабораторной работы.

Формирование умения использовать формулы пропорциональных режимов работы центробежных машин.

Задание.

Научиться использовать формулы пропорциональных режимов работы центробежных нагнетателей.

При изменении частоты вращения колеса вентилятора, установленного в данной сети, расход воздуха Q изменяется пропорционально частоте вращения n , давление, развиваемое вентилятором P , — пропорционально квадрату частоты вращения и мощность N — пропорционально кубу частоты вращения:

$$Q_{\phi}/Q_n = n_{\phi}/n_n ; \quad (25)$$

$$P_{\phi}/P_n = (n_{\phi}/n_n)^2 ; \quad (26)$$

$$N_{\phi}/N_n = (n_{\phi}/n_n)^3 , \quad (27)$$

где индекс «ф» - фактическая величина, «н» - номинальная.

Таблица 13

Теоретические (рассчитанные) и экспериментальные параметры вентилятора.
Данные взяты из результатов лабораторной работы №10

Параметр	Значение	n_{ϕ}/n_n	$(n_{\phi}/n_n)^2$	$(n_{\phi}/n_n)^3$	Q_{ϕ}/Q_n	P_{ϕ}/P_n	N_{ϕ}/N_n	Отклонение, %
n_{ϕ} (50%)	1500	0,5	0,25	0,125	0,487	0,216	0,148	формула (25) 2,64%
n_n (100%)	3000							
Q_{ϕ} (50%)	2122							
Q_n (100%)	4359							
P_{ϕ} (50%)	297							формула (26) 13,43%
P_n (100%)	1373							
N_{ϕ} (50%)	662							формула (27) 18,52%
N_n (100%)	4467							

Вывод: практический эксперимент в лабораторных условиях демонстрирует значительное отклонение в формулах (26), (27). Данный факт демонстрирует, что формулы пропорциональных режимов на реальных системах нуждаются либо в корректировке эмпирическими коэффициентами, либо в доводке системы до расчётных параметров при пусконаладочных работах.

Литература

1. ГОСТ 8.586.(1-5)-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 1-5.
2. Сборник задач по машиностроительной гидравлике: учеб. пособие для машиностроительных вузов / Д.А. Бутаев, З.А. Калмыкова, Л.Г. Подвидз [и др.]; Под ред. И.И. Куколевского, Л.Г. Подвидза. - 5-е изд., стереотипное. - Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 448 с., ил.
3. Центробежные насосы. Лексикон. KSB Aktiengesellschaft. Дитер-Хайнц Хелльманн. Под ред. А.А. Жарковского, В.А. Зимницкого. Электронное издание.
4. Программное обеспечение WILO Select.

Учебное издание

Андрей Юрьевич Плавич
Павел Владимирович Сперанский
Игорь Станиславович Александров

НАСОСНЫЕ И ВОЗДУХОДУВНЫЕ СТАНЦИИ

Редактор Э. С. Круглова

Подписано в печать 29.12.2022 г. Формат 60 × 90 1/16.
Уч.-изд. л. 2,9. Печ. л. 2,6. Тираж 31 экз. Заказ № 79

Издательство федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»
236022, Калининград, Советский проспект, 1