

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Центр инженерного оборудования

(наименование)

08.04.01 Строительство

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Водоснабжение городов и промышленных предприятий

(направленность (профиль)/специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Автоматизированный контроль работы насосов  
в системе водоснабжения

Студент

А.Ш. Шобутолибов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный руководитель

доктор техн. наук, профессор, В.А. Селезнев

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

## Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 Теоретические основы движения жидкости.....	7
1.1 Экспериментальное изучение движения жидкости .....	9
1.2 Теоретические основы работы центробежного насоса.....	19
1.3 Характеристика центробежного насоса .....	25
1.4 Методика расчёта энергопотребления насосными установками.....	33
Глава 2 Системы автоматизированного управления насосных станций.....	39
2.1 Область применения систем автоматизации .....	39
2.2 Проблемы автоматизации систем водоснабжения.....	42
2.3 Основные принципы систем автоматизации .....	45
2.4 Системные аспекты автоматизации городской системы водоснабжения.....	51
2.5 Наблюдение за системой водоснабжения .....	52
2.6 Некоторые аспекты цифровизации автоматизированного управления .	55
2.7 Обнаружение системных аномалий.....	56
2.8 Обработка помех в системах автоматизации.....	58
2.8 Автоматизация систем водоподготовки.....	60
2.9 Контроль давления в системах распределения воды.....	64
2.10 Обнаружение утечек.....	66
2.11 Стимулирующие факторы для экономии энергии .....	67
2.12 Интегрированные системы .....	70
2.13 Децентрализованные системы подачи и распределения воды .....	71
2.14 Перспективы развития систем автоматизации .....	73
2.14 Экологический аспект внедрение средств автоматизации.....	76
Глава 3 Практическое применение теоретических и экспериментальных результатов.....	79
3.1 Расчёт энергопотребления насосными установками .....	79
3.2 Определение влияния внутренней коррозии труб на энергетические характеристики насоса .....	81
3.3 Оценка потенциала энергосбережения.....	90
Заключение .....	93
Список используемых источников.....	94

## Введение

Проблемы, связанные с управлением водными ресурсами, неуклонно возрастают в связи с изменением климата, демографическими и социально-экономическими изменениями. Такое изменение может спровоцировать конфликты между пользователями (ирригация, питьевая вода, промышленность, гидроэнергетика и т.д.) и между регионами. Кроме того, наводнения и засухи продолжают опустошать многие регионы нашей страны, в то время как водные экосистемы подвергаются все большей угрозе.

Обеспечение доступа к данным и информации о состоянии и тенденциях в области водных ресурсов, а также об их использовании является одним из ключевых факторов успешного осуществления политики в области водных ресурсов, будь то на национальном или международном уровне.

Организации, осуществляющие водопользование должны иметь возможность получать достоверную, актуальную и актуальную информацию для всей своей деятельности, включая регулирование, планирование, адаптацию к изменению водопотребления, управление рисками и информационной среде.

Однако необходимые данные и информация, как правило, являются фрагментарными, неполными, разрозненными и разнородными, и доступ к ним зачастую трудно организовать по многим причинам (множественность производителей данных, несогласованность данных и информации).

Часто используется недостаточный объем данных, отсутствует регулярное обновление информации о водопользовании необходимой для эффективного осуществления политики в области водных ресурсов.

Это может иметь значительные негативные экономические последствия, особенно в случае принятия решений, основанных на неполных или неточных данных и информации. Тем не менее улучшение можно добиться при наличии достаточно развитой системы автоматизации, соответствующего плана действий, направленного, с одной стороны, на рационализацию доступа к имеющейся информации и, с другой стороны, на организацию подготовки

недостающих данных и их преобразования в информацию, полезную для принятия решений для оптимального использования имеющегося оборудования на водопроводных сетях.

Настоящая работа посвящена изучению основных принципов работы насосного хозяйства в системах водоснабжения населенных мест и промышленных предприятий, оценки энергетической эффективности данного оборудования, разработке мероприятий, направленных на повышение потенциала энергосбережения, внедрение новых средств измерений, информационных технологий, комплексных систем контроля и учёта то за потреблением такого ценного ресурса как вода.

В работе рассмотрены российские нормативные акты в сфере водопользования, а также некоторые документы различных международных организаций, которые направлены на повышение надежности и безопасности водоснабжения различных регионов мира, Проведён анализ возможности использования международного опыта для решения проблем автоматизации систем водоснабжения в Российской Федерации.

«Руководство по комплексному управлению водными ресурсами», опубликованное в марте 2009 года на пятом Всемирном форуме по водным ресурсам в Стамбуле, и «Руководство по комплексному управлению водными ресурсами, водными ресурсами и бассейнами приграничных рек, озер и водоносных горизонтов», опубликованный в 2012 году на 6-м Всемирном форуме по водным ресурсам в Марселе. «Руководство по организации и восстановления водных экосистем в бассейнах рек и озер», опубликованный в марте 2015 года в ходе 7-го Всемирного водного Форума в северной Корее, и некоторые другие.

Таким образом можно заметить, что проблемы, рассматриваемые в настоящей работе актуальны не только в России, но и за рубежом. За последние годы проблема улучшения качества водоснабжения, в том числе и за счет автоматизации насосного хозяйства многократно поднималась на различных международных форумах.

При формировании темы настоящей работы были выявлены следующие элементы системного подхода:

– **объект исследования:** насосный хозяйство водопроводных систем городских;

– **предмет исследования:** системы автоматизации и управления насосными станциями;

– **основная проблема:** создание достаточно простой и в тоже время надежной и эффективной системы автоматизированного управления насосным хозяйством.

При формулировании проблемы исследования было выделено **противоречие:** Требуется оптимизировать систему управления насосным хозяйством таким образом, чтобы упростить, удешевить её, но при этом обеспечить высокую степень автоматизации и надежность управления.

**Целью** работы является: Оптимизация системы автоматизированного управления насосной станции для повышения энергоэффективности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1) Исследовать гидродинамические процессы, протекающие при работе центробежного насоса.

2) Проанализировать принципиальные решения при проектировании систем автоматизированного управления насосными станциями.

3) Разработать энергосберегающие мероприятия, провести технико-экономические сравнения принятых решений

**Научная новизна** полученных результатов состоит в обосновании и разработке мероприятия по повышению энергетической эффективности повысительных насосных станций на основании анализа возможности применения современных систем автоматизации и управления.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач проводилось документальное исследование достигнутого уровня техники в области водоснабжения и эксплуатации насосных установок.

**Практическая значимость работы** состоит в разработке предложений для повышения экономичности и безопасности работы насосного хозяйства, научно обоснованном подходе к выбору оборудования, определение наиболее экономичных сочетания режимов, устранение несоответствия параметров насоса и сети посредством регулирования и мониторинга трубопроводов.

Практическая значимость работы подтверждена в публикации результатов исследования в статье:

Влияние геометрии улитки насоса на параметры потока. В сборнике статей Всероссийской научно-практической конференции Природопользование и устойчивое развитие регионов России. – МНИЦ, Пенза, 2021.

**Личный вклад автора** состоит в непосредственном участии в обследовании систем холодного водоснабжения, насосного хозяйства, анализе полученных данных, обосновании темы, цели, задач и методики исследований. Автором предложен ряд организационных, малозатратных и долгосрочных мероприятий применительно к повышению энергоэффективности работы насосов.

**На защиту выносятся:** Результаты документального исследования, позволяющие оптимизировать работу насосного оборудования в водопроводных сетях, обоснование необходимости устройства систем автоматизированного управления и контроля за работой насосов.

**Апробация работы.** Диссертация носит методологический характер и проявляет себя в наличии научно обоснованных и апробированных в результате документального исследования методов и средств совершенствования расчёта энергетических характеристик насоса.

Автор организовал и принимал участие в проведении документального исследования и разработки технического отчёта.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, общих выводов, библиографии из 35 наименования. Общий объем работы 97 стр., включая 35 иллюстраций, 6 таблиц.

## Глава 1 Теоретические основы движения жидкости

При движении реальной жидкости в ней возникают силы трения, ведущие к появлению касательных напряжений  $\tau$ , которые отсутствуют в покоящейся жидкости. «В пространстве они представлены трехосным эллипсоидом напряжений (на плоскости эллипсом напряжений). При движении реальной жидкости в некоей точке нормальное напряжение  $\sigma_n$  будет зависеть от ориентировки площадки действия: в гидродинамике для намеченных в данной точке площадок действия, имеющих разный наклон, значение  $\sigma_n$  будет в отличие от гидростатики разное» [4].

«Гидравлическая сеть – совокупность трубопроводов и аппаратов, перемещение жидкости обеспечивает насос. При движении потока по трубопроводу происходит потеря его энергии. С точки зрения физики и, в частности всеобщего закона сохранения энергии, термин «потеря энергии» не совсем корректен. Но с инженерной точки зрения это именно потеря энергии потока, которая перешла в тепловую – диссипация энергии» [8].

Потери напора на трение – это необратимое убывание энергии потока жидкости, связанное с преодолением сил вязкости. «В любом потоке жидкости, ограниченном твердыми стенками, скорости в поперечном сечении распределены неравномерно. По оси канала или трубы скорость максимальна, а на стенках она равна нулю. Поэтому смежные частицы жидкости движутся с различными скоростями и под действием сил вязкости возникают касательные напряжения трения, на преодоление которых затрачивается часть энергии (напора) потока жидкости» [29].

«При ламинарном режиме, когда движение упорядоченное, слоистое, без перемешивания частиц жидкости, потери напора минимальны. При турбулентном режиме, характеризующимся интенсивным хаотическим перемешиванием частиц жидкости, затраты энергии значительно больше, так как к затратам на преодоление сил трения добавляются затраты на образование завихрений, водоворотов и перемешивание жидкости. Также существенное

влияние оказывает шероховатость стенок, это особенно заметно в трубах малого диаметра. Численно потерю энергии выражается как в виде потери напора  $h_{nom}$  (метры столба перекачиваемой жидкости), так и в виде потери давления  $\Delta P_{nom}$  (Па)» [7]. Между давлением жидкости  $P$  и высотой её столба  $h$  существует связь:  $P = \rho gh$

Потери напора на трение вычисляют по формуле Дарси–Вейсбаха:

$$h_{тр} = \lambda \frac{l V^2}{d 2g}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления трения;

$l, d$  – длина и диаметр трубопровода, м;

$V$  – средняя скорость течения, м/с;

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

«Потери напора на трение прямо пропорциональны длине трубопровода и называются линейными. Коэффициент сопротивления трения зависит от вязкости и режима течения жидкости, формы и размеров сечения, от величины шероховатости стенок трубы. При ламинарном режиме течения жидкости этот коэффициент может быть точно определен теоретически, а в прочих случаях он определяется опытным путем» [3].

Потери напора принято подразделять на две категории:

– потери напора, распределённые вдоль всего канала, по которому перемещается жидкость (трубопровод), эти потери пропорциональны длине канала и называются потерями напора по длине  $h_d$ ;

– потери напора на локальной длине потока, достаточно малой по сравнению с протяжённостью всего потока. Этот вид потерь во многом зависит от особенностей преобразования параметров потока (скоростей, формы линий тока и др.). Как правило, видов таких потерь довольно много и их расположение по длине потока не закономерно. Такие потери напора называют местными потерями или потерями напора на местных гидравлических сопротивлениях.

Это вид потерь напора вычисляется в долях от скоростного напора:

$$h_M = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

Тогда полные потери напора можно представить собой как сумму всех видов потерь напора:

$$h_{\text{тр}} = h_l + \sum h_M \quad (3)$$

Оценка величины местных потерь напора практически всегда базируются на результатах экспериментов, по их результатам определяются величины коэффициентов потерь [30].

### 1.1 Экспериментальное изучение движения жидкости

«В экспериментах с потоками движущейся жидкости замечено, что на величину гидравлических сопротивлений кроме физических свойств самой жидкости, формы и размеров каналов, состояния их стенок, существенное влияние оказывает особенности движения частиц жидкости в потоке» [18]. Смена режима движения жидкости зависит от целого комплекса параметров потока, а именно от соотношения:

$$\text{Re} = \frac{Vd}{\nu} = \frac{\rho Vd}{\mu} \quad (4)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

«Коэффициент сопротивления трения (коэффициент Дарси), в случае ламинарного режима зависит только от числа Рейнольдса и для любых ньютоновских жидкостей вычисляется по формуле Пуазейля

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (5)$$

Число Рейнольдса безразмерная величина, представляющая собой отношение сил инерции к силам вязкостного трения. Критическая величина

числа Рейнольдса, при котором происходит смена режима движения жидкости  $Re_{кр} = 2320$  (рисунки 1, 2)» [12].

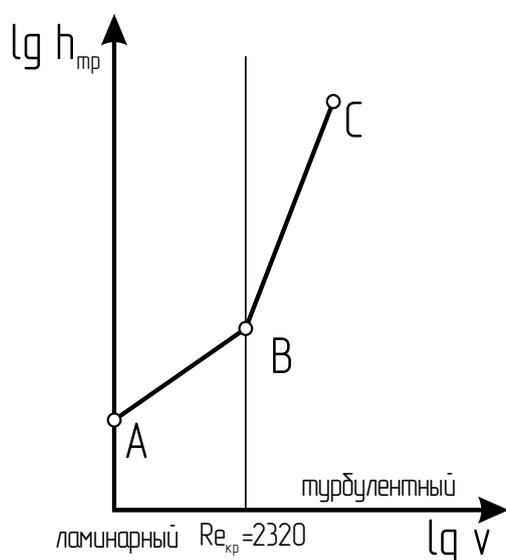


Рисунок 1 – Зависимость потерь напора от скорости

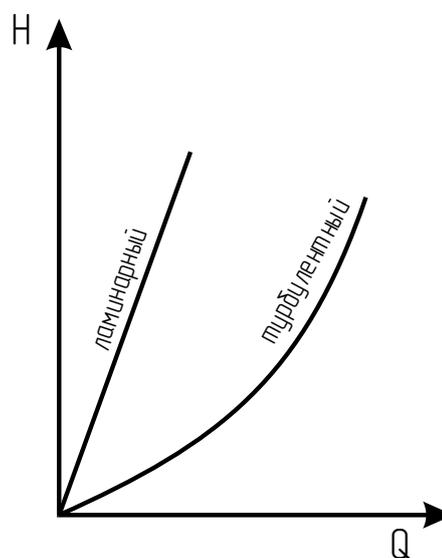


Рисунок 2 – Гидравлическая характеристика сети

«При смене режима движения существенно меняется зависимость величины гидравлических сопротивлений от скорости жидкости. На рисунке 3.1 показана зависимость потерь напора от скорости, построенных в билогарифмической системе координат:  $lg h_{гр} = lg b + k lg v$ .

Зависимость состоит из двух участков: ламинарного (АВ) и турбулентного (ВС) режимов движения жидкости. Каждому из участков соответствует уравнение:  $h_{гр} = b v^k$ .

Для ламинарного участка (АВ) наклон линии к оси абсцисс  $k = tg45^\circ = 1$ , для турбулентного участка (ВС) наклон линии превышает 1 и изменяется в пределах 1,75 - 2,0.

Вид гидравлической характеристики зависит от режима движения жидкости в трубопроводе: при ламинарном движении жидкости гидравлическая характеристика трубопровода - прямая линия, проходящая через начало координат. При турбулентном режиме гидравлическая характеристика - парабола (рисунок 2)» [1].

**Турбулентное движение жидкости.** «Так как в подавляющем большинстве случаев вода в трубопроводе движется в турбулентном режиме целесообразно рассмотреть именно этот вид движения. Отличительной особенностью которого, является хаотическое движение частиц в потоке. Однако при этом часто можно наблюдать и некоторую закономерность движения. С помощью термогидрометра, прибора позволяющего фиксировать изменение скорости в точке замера, можно снять кривую скорости» [11].

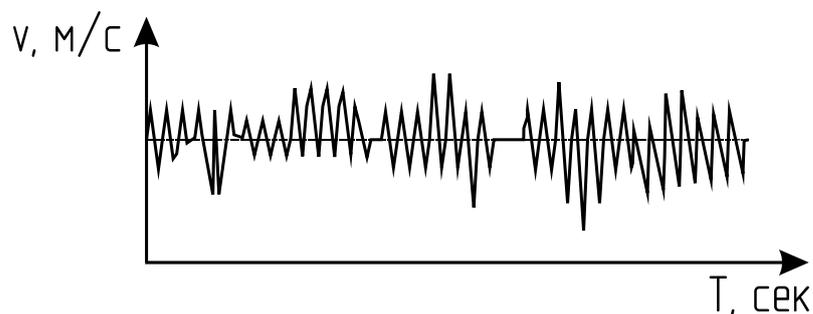


Рисунок 3 – Кривая пульсации скорости

«Если выбрать интервал времени достаточной продолжительности, то окажется, что колебания скорости наблюдаются около некоторого уровня, который сохраняется постоянным при выборе различных интервалов времени. Величина скорости в данной точке в данный момент времени называется мгновенной скоростью. График изменения мгновенной скорости во времени  $u(t)$  представлена на рисунке 3. Если выбрать на кривой скоростей некоторый интервал времени и провести интегрирование кривой скоростей, а затем найти среднюю величину, то получится величина осреднённой скорости  $\bar{u}$ :

$$\bar{u} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u(t) dt. \quad (6)$$

Разница между мгновенной и осреднённой скоростью называется скоростью пульсации  $u' = u - \bar{u}$ .

Если величины осреднённых скоростей в различные интервалы времени будут оставаться постоянными, то такое турбулентное движение жидкости будет установившемся» [13].

«При неустановившемся турбулентном движении жидкости величины осреднённых скоростей меняются во времени. Пульсация жидкости является причиной перемешивания жидкости в потоке. Интенсивность перемешивания зависит от числа Рейнольдса, т.е. при сохранении прочих условий от скорости движения жидкости. Таким образом, в конкретном потоке жидкости (вязкость и размеры сечения определены первичными условиями) характер её движения зависит от скорости и для турбулентного потока это имеет решающее значение» [11].

«В периферийных слоях жидкости скорости всегда будут минимальными, и режим движения в этих слоях ламинарным. Увеличение скорости до критического значения приведёт к смене режима с ламинарного на турбулентный. В реальном потоке присутствуют оба режима ламинарный и турбулентный. Ламинарная зона (у стенки канала) и турбулентное ядро в центре, поскольку скорость к центру турбулентного потока нарастает интенсивно, то толщина периферийного ламинарного слоя чаще всего незначительна, слой называется ламинарной плёнкой, толщина которой зависит от скорости движения жидкости» [20].

Распределение скоростей по сечению турбулентного потока. Эпюра осреднённых скоростей в турбулентном потоке в значительной степени сглажена и практически скорости в разных точках живого сечения равны средней скорости.

Сопоставляя эпюры (рисунок 4) скоростей турбулентного потока (эпюра 1) и ламинарного потока (эпюра 2) позволяют сделать вывод о практически равномерном распределении скоростей в живом сечении.

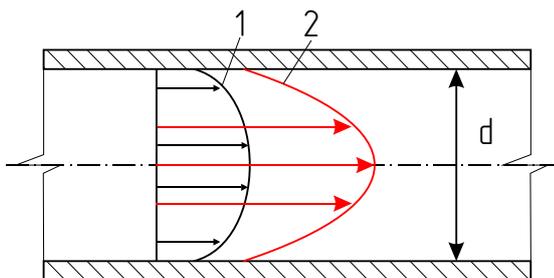


Рисунок 4 – Эпюры скоростей турбулентного потока

«А изменения касательных напряжений по сечению потока близки к логарифмическому закону. При некоторых допущениях: течение вдоль бесконечной плоскости и равенстве касательных напряжений во всех точках на поверхности  $\tau_0$

$$du = \frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\chi r} dr \quad (7)$$

После интегрирования:  $u = \frac{1}{\chi} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \ln r + C$ .

Последнее выражение преобразуется к следующему виду» [16]:

$$\frac{\bar{u}}{u} = \frac{1}{\chi} \ln \frac{ur}{v} + const. \quad (8)$$

**Гидравлически гладкие и шероховатые трубы.** «Состояние стенок трубы в значительной мере влияет на поведение жидкости в турбулентном потоке. При ламинарном движении вода движется медленно и плавно, спокойно обтекая на своём пути незначительные препятствия. Возникающие при этом местные сопротивления настолько ничтожны, что их величиной можно пренебречь. В турбулентном же потоке такие малые препятствия служат источником вихревого движения, что приводит к возрастанию этих малых местных сопротивлений, которыми в ламинарном потоке можно пренебречь. Такими малыми препятствиями на стенке трубы является шероховатость» [6].

«Эквивалентная шероховатость – условная, постоянная по длине трубы шероховатость, образованная выступами одинаковой высоты  $e_a$ , при которой потери энергии потока на трение будут такими же как при реальной шероховатости с выступами различной величины. Эквивалентная шероховатость не может быть непосредственно измерена и определяется путем точных гидравлических испытаний. Для практических целей применяются два вида шероховатости: абсолютная и относительная» [14].

«Абсолютная шероховатость – среднее значение размеров выступов  $k$  внутренней поверхности трубы. Шероховатость зависит от материала трубы, качества ее изготовления и условий эксплуатации и сама по себе не оказывает

влияния на величину потерь, т.к. они еще зависят от поперечных размеров потока. По этому вводят понятие относительной шероховатости.

Относительная шероховатость – отношение абсолютной шероховатости к диаметру трубы, т.е.  $e = k/d$ . Относительная шероховатость оказывает влияние на потери. Коэффициент трения определяется опытным путем» [14] Средние значения абсолютной шероховатости приведены в таблице 1.

Таблица 1 Зависимость абсолютной шероховатости от типа трубы

Тип труб	Абсолютная шероховатость $k$ , мм
Стальные, новые	0,05–0,15
Стальные, при незначительной коррозии	0,2-0,3
Стальные, старые, заржавленные	> 0,67
Чугунные, новые	0,25–1,0
Чугунные, бывшие в эксплуатации	1,4

«В гидравлике абсолютная величина выступов шероховатости зависит от качества обработки трубы и обозначается  $\Delta$ . Если толщина ламинарной плёнки  $\delta \gg \Delta$ , то выступы шероховатости погружены в ламинарную плёнку и турбулентному ядру течения они недоступны (их наличие не сказывается на потоке). Такие трубы называются гидравлически гладкими. Когда размер выступов шероховатости превышает толщину ламинарной плёнки, то плёнка теряет свою сплошность, и выступы шероховатости становятся источником многочисленных вихрей, что существенно сказывается на потоке жидкости в целом. Такие трубы называются гидравлически шероховатыми. Существует и промежуточный вид шероховатости, когда выступы шероховатости становятся соизмеримыми с толщиной ламинарной плёнки  $\delta \approx \Delta$ » [22]. Толщину ламинарной плёнки можно оценить исходя из эмпирического уравнения:

$$\frac{\delta}{d} = \frac{32,5}{Re\sqrt{\lambda}} \quad (9)$$

Нормальный профиль и параметры шероховатости поверхности (рисунок 5).

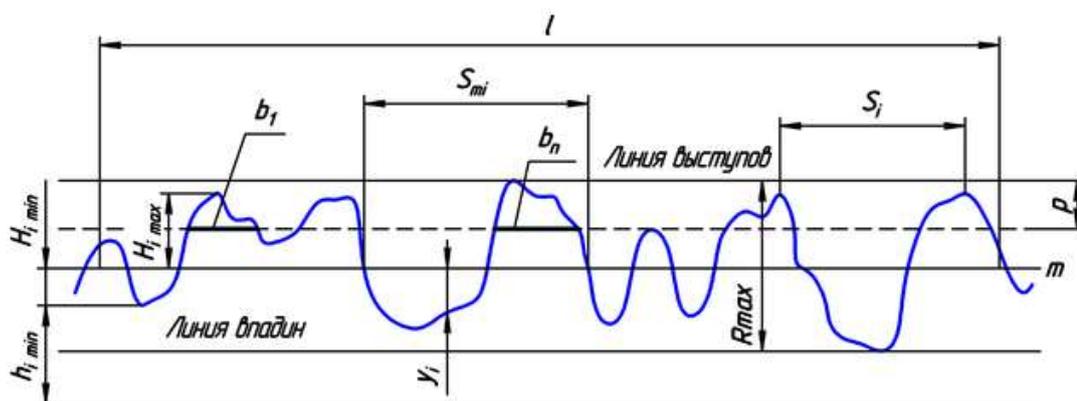


Рисунок 5 – Параметры шероховатости

На рисунке 5 схематично показаны параметры шероховатости, где:  $l$  – базовая длина;  $m$  – средняя линия профиля;  $S_{mi}$  – средний шаг неровностей профиля;  $S_i$  – средний шаг местных выступов профиля;  $H_i \max$  – отклонение пяти наибольших максимумов профиля;  $H_i \min$  – отклонение пяти наибольших минимумов профиля;  $h_i \max$  – расстояние от высших точек пяти наибольших максимумов до линии параллельной средней и не пересекающей профиль;  $h_i \min$  – расстояние от низших точек пяти наибольших минимумов до линии параллельной средней и не пересекающей профиль;  $R_{max}$  – наибольшая высота профиля;  $y_i$  – отклонения профиля от линии  $m$ ;  $p$  – уровень сечения профиля;  $b_n$  – длина

### Потери напора на трение в турбулентном потоке жидкости.

«Эмпирические формулы для определения коэффициента трения. Наибольшее распространение получила формула Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (10)$$

По данным экспериментов формула Блазиуса подтверждается в пределах значений от  $Re_{кр}$  до  $1 \cdot 10^5$ . Другой эмпирической формулой является формула П.К. Конакова. Она имеет более широкий диапазон применения до значений числа Рейнольдса в несколько миллионов» [24]:

$$\lambda = \frac{1}{(1,81 \lg Re - 1,5)^2} \quad (11)$$

Почти совпадающие значения по точности и области применения имеет формула Г.К. Филоненко:

$$\lambda = \left( \frac{0,55}{\lg \frac{Re}{8}} \right)^2 \quad (12)$$

«Изучение движения жидкости по шероховатым трубам в области, где потери напора определяются только шероховатостью стенок труб, и не зависят от скорости  $\lambda=f(\Delta/d)$  движения жидкости, т.е. от числа Рейнольдса осуществлялось Прандтлем и Никурадзе. В результате экспериментов на моделях с искусственной шероховатостью была установлена зависимость для коэффициента Дарси для квадратичной области течения жидкости:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{3,7d}{\Delta} = -2 \lg 0,27 \frac{\Delta}{d}$$

$$\lambda = \left( 1,14 + 2 \lg \frac{d}{\Delta} \right)^{-2} \quad (13)$$

Для труб с естественной шероховатостью применяется формула Шифринсона

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25} \quad (14)$$

где  $\Delta$  – эквивалентная величина выступов шероховатости. Более сложная ситуация при движении жидкости в переходной области течения, когда величина потерь напора зависит от обоих факторов,

$$\lambda = f \left( Re \frac{\Delta}{d} \right) \quad (15)$$

Наиболее приемлемых результатов добились Кёллебрук - Уайт:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + 0,27 \frac{\Delta}{d} \right) \quad (16)$$

Несколько отличная формула получена Н.З. Френкелем:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[ \left( \frac{6,851}{Re} \right)^{0,9} + 0,27 \frac{\Delta}{d} \right] \quad (17)$$

Формула Френкеля хорошо согласуется с результатами экспериментов других авторов с отклонением (в пределах 2 - 3%). Позднее А.Д. Альтшуль получил простую и удобную для расчётов формулу:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (18)$$

Результаты обобщения экспериментов представлялись в графической форме графики Никурадзе, Зегжда, Мурина. На рисунке 6 выделены четыре области течения жидкости» [27]:

I ламинарное течение жидкости (прямая А),  $\lg Re=2,6 - 3,1$

II турбулентное в гидравлически гладких трубах (прямая В),  $\lg Re=3,1 - 3,5$

III переходная область течения жидкости,  $\lg Re=3,5 - 5,0$

IV квадратичная область течения жидкости,  $\lg Re>4,6 - 5,0$

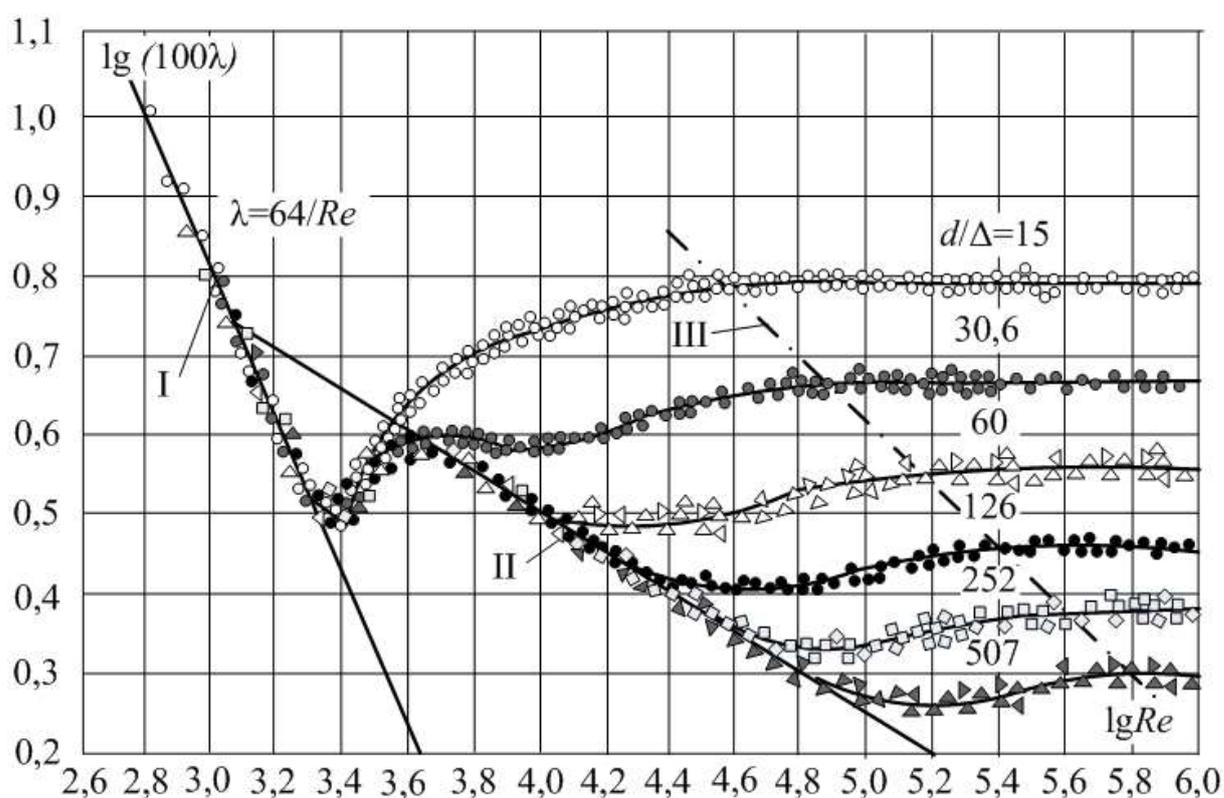


Рисунок 6 – График Никурадзе

«При напорном движении жидкости простой трубопровод работает полным сечением:  $S = const$ . Размер сечения трубопровода (диаметр  $D$  или величина гидравлического радиуса  $R_h$ ), его длина  $l$  являются основными геометрическими характеристиками. Основными технологическими характеристиками трубопровода являются расход жидкости в трубопроводе  $Q$  и напор  $H$  в его начале. Большинство других характеристик простого трубопровода являются, не смотря на их важность, производными

характеристиками. В простом трубопроводе расход жидкости не меняется, то средняя скорость жидкости  $V=const$ . Для установившегося движения жидкости по трубопроводу средняя скорость движения жидкости определяется по формуле Шези:

$$V = C\sqrt{R_r i} \quad (19)$$

где  $C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$  – скоростной коэффициент Шези,

$R_r = d/4$  – гидравлический радиус сечения, для круглого сечения при полном заполнении жидкостью;

$i = h_{mp}/l$  – гидравлический уклон» [16].

«Если весь имеющийся напор в начале трубопровода тратится на преодоление сил трения в трубопроводе (в простом трубопроводе это потери напора по длине  $h_{dl}$ ), уравнение движения жидкости (Бернулли) примет вид:

$$H = h_{dl} = \frac{V^2 l}{C R_r} \quad (20)$$

Расход жидкости в трубопроводе:

$$Q = VS = SC\sqrt{R_r i} \quad (21)$$

при  $K = SC\sqrt{R_r}$  имеем основное уравнение простого трубопровода:

$$Q = K\sqrt{i} \quad (22)$$

где  $K$  – модуль расхода - расход жидкости в русле заданного сечения при гидравлическом уклоне равном единице (расходная характеристика трубопровода).

Основное уравнение простого трубопровода относительно напора:

$$H = Q^2 \frac{l}{K^2} = RQ^2 \quad (23)$$

$K^2$  – удельное сопротивление трубопровода,

$R=l/K^2$  – полным сопротивлением трубопровода» [21].

«График уравнения простого трубопровода  $H = f(Q)$  называется его гидравлической характеристикой. Если на трубопроводе, собранном из труб

одинакового диаметра имеются местные сопротивления, то его можно привести к простому трубопроводу эквивалентной длины  $l_{эк}$  [21].

$$l_{эк} = l + \frac{d}{\lambda} \cdot \sum \xi_m. \quad (24)$$

## 1.2 Теоретические основы работы центробежного насоса

Жидкость подводится к рабочему колесу центробежного насоса в направлении оси вала, со скоростью  $v$ . «В рабочем колесе направление струй жидкости изменяется от осевого до радиального, перпендикулярного оси вала (рисунок 7). В каналы рабочего колеса жидкость поступает со скоростью  $v_1$  которая увеличивается в каналах и на выходе из колеса достигает значения  $v_2$  (индексом 1 обозначаются скорости и углы на входе в рабочее колесо, а индексом 2 – на выходе). Перемещаясь по каналу рабочего колеса, частицы жидкости совершают сложное движение: вращательное – вместе с колесом с окружной скоростью и поступательное – относительно поверхностей лопастей со скоростью  $w$ . Относительная скорость направлена по касательной к поверхности лопасти в данной точке, а окружная скорость  $u$  – по касательной к окружности, на которой лежит эта точка» [19].

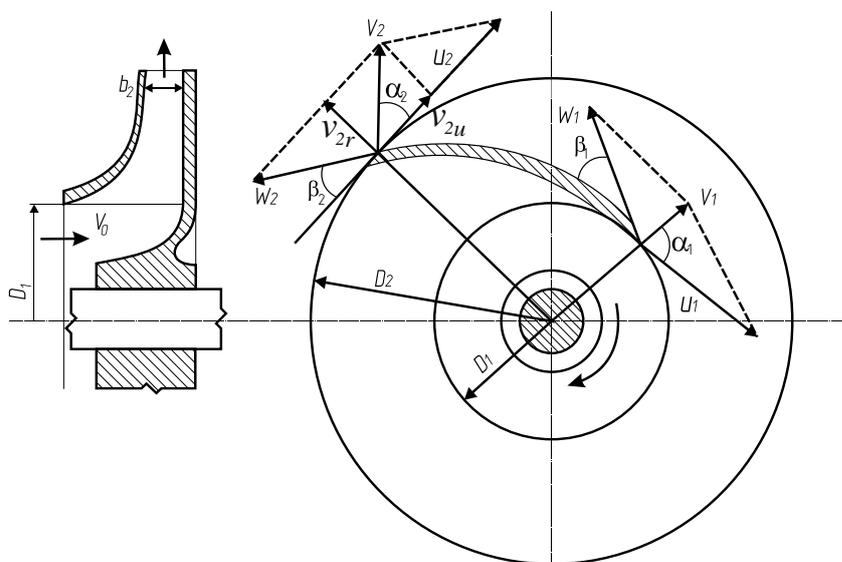


Рисунок 7 – Схема движения жидкости в рабочем колесе центробежного насоса

На выходе из рабочего колеса окружная скорость:

$$u_2 = \pi D_2 n, \quad (25)$$

где  $D_2$  – диаметр рабочего колеса, м;

$n$  – частота вращения колеса,  $c^{-1}$ .

«Предполагается, что движение жидкости в рабочем колесе струйное и траектории каждой движущейся частицы совпадают с очертанием лопасти. В результате выводов, полученных на основе такого предположения, в дальнейшем потребуется внести коррективы (коэффициенты), учитывающие реальное движение жидкости. Абсолютная скорость движения жидкости  $v$  равна геометрической сумме ее составляющих  $v = w + u$ . Радиальная составляющая абсолютной скорости (меридиональная скорость):

$$v_r = v \sin \alpha, \quad (3.26)$$

где  $\alpha$  – угол между абсолютной скоростью  $v$  и касательной к окружности в точке схода частицы жидкости с лопасти (или входа на нее).

Окружная составляющая абсолютной скорости:

$$v_u = v \cos \alpha, \quad (27)$$

Изменение момента количества движения массы жидкости за 1 с. При этом масса участвующей в движении жидкости составит:

$$m = \rho Q, \quad (28)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,

$Q$  – подача насоса.

Момент количества движения относительно оси рабочего колеса во входном сечении при скорости движения в этом сечении  $v_1$  будет равен  $M_1 = \rho Q v_1 r_1$ , а момент количества движения на выходе из рабочего колеса:  $M_2 = \rho Q v_2 r_2$ , где  $r_1$  и  $r_2$  — расстояния от оси колеса до векторов входной и выходной скоростей соответственно» [7].

Сумма моментов сил:

$$\sum M_c = M_2 - M_1 = \rho Q(v_2 r_2 - v_1 r_1), \quad (29)$$

$$r_1 = \frac{D_1}{2} \cos \alpha_1; \quad r_2 = \frac{D_2}{2} \cos \alpha_2$$

$$\sum M_c = \rho Q(v_2 \frac{D_2}{2} \cos \alpha_2 - v_1 \frac{D_1}{2} \cos \alpha_1). \quad (30)$$

«Момент сил тяжести всегда равен нулю, так как плечо этих сил равно нулю (они проходят через ось вращения колеса). Момент сил давления в расчетных сечениях также равен нулю.

Мощность, передаваемая жидкости рабочим колесом, т.е. произведение  $M_k$  на относительную скорость, равна произведению расхода на теоретическое давление  $p_T$ , создаваемое насосом. т. е.  $M_k w = Q p_T$ .

Таким образом, уравнение (3.30) можно представить в виде:

$$Q p_T = w \rho Q(v_1 \frac{D_2}{2} \cos \alpha_2 - v_1 \frac{D_1}{2} \cos \alpha_1). \quad (31)$$

Переносные скорости движения в рассматриваемых сечениях  $C$  на входе в колесо и выходе из него соответственно равны:

$$u_1 = w \frac{D_1}{2}; \quad u_2 = w \frac{D_2}{2}.$$

Подставив их значения в уравнение (3.31) и разделив обе его части на  $pQ$ , получим:

$$p_T = \rho(u_2 v_2 \cos \alpha_2 - u_1 v_1 \cos \alpha_1), \quad (32)$$

$$H_T = (u_2 v_2 \cos \alpha_2 - u_1 v_1 \cos \alpha_2)/g, \quad (33)$$

Зависимости (32) и (33) – основные уравнения лопастного насоса, выведенные из условия пренебрежения силами трения, и отражающие зависимость теоретического давления или напора, развиваемого насосом, от основных параметров рабочего колеса. В рабочее колесо большинства насосов жидкость поступает практически радиально ( $\alpha_l=0^\circ$ , следовательно,  $u_l=0$ ), поэтому уравнения (32) и (33) упрощаются и принимают вид:

$$p_T = \rho u_2 v_2, \quad H_T = \frac{u_2 v_2}{g}.$$

Основные уравнения центробежного насоса показывают, что теоретическое давление и напор, развиваемые насосом, тем больше, чем больше окружная скорость на внешней окружности рабочего колеса, т. е. его диаметр, частота вращения и угол  $\beta_2$  (рисунок 7), т.е. чем круче расположены лопасти рабочего колеса» [19].

«Действительные давление и напор, развиваемые насосом, меньше теоретических, так как реальные условия работы насоса отличаются от идеальных, принятых при выводе уравнения. Влияние конечного числа лопастей учитывается введением поправочного коэффициента  $k$ , характеризующего уменьшение величины  $v_{2u}$ . Уменьшение давления вследствие гидравлических потерь учитывается введением гидравлического коэффициента полезного действия. С учетом этих поправок полное давление:

$$p = k\eta_r \rho u_2 v_{2u}, \quad (34)$$

полный напор:

$$H = k\eta_r \frac{u_2 v_{2u}}{g}. \quad (35)$$

Значение коэффициента  $\eta$  зависит от конструкции насоса, его размеров и качества выполнения внутренних поверхностей проточной части колеса и находится в пределах 0,8–0,95.  $k$  0,75–0,9 при числе лопастей от 6 до 10,  $\alpha_2 = 8 - 14^\circ$  и  $v_{2u} = 1,5 - 4$  м/с» [19].

#### **Теоретическая подача центробежного насоса:**

«Теоретическую подачу центробежного насоса  $Q_T$ , м<sup>3</sup>/ч, можно вычислить по уравнению неразрывности потока

$$Q_T = F v_{cp}, \quad (36)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения потока;

$v_{cp}$  – средняя скорость потока, нормальная этому сечению.

Площадь живого сечения потока на выходе из рабочего колеса центробежного насоса вычисляется (без учета стеснения его лопастями) как боковую поверхность цилиндра диаметром, равным диаметру колеса  $D_2$ , и

высотой, равной ширине канала колеса  $b_2$ , т.е.  $F = \pi D_2 b_2$ . Скорость потока, нормальная этой поверхности, меридиональная скорость

$$v_{2r} = u \sin \alpha_2. \quad (37)$$

Если принять, что в рабочем колесе имеется бесконечно большое число бесконечно тонких лопастей, то эта скорость во всех точках цилиндрической поверхности будет одинаковой и равной средней скорости на выходе ( $v_{2r} = v_{cp}$ ). Подставляя полученные значения  $F$  и  $v_{cp}$  в уравнение расхода, получим формулу для определения теоретической подачи насоса

$$Q_T = \pi D_2 b_2 v_{cp}. \quad (38)$$

Для входного сечения колеса  $Q_I = \pi D_1 b_1 v_{1r}$ .

Полезная подача центробежного насоса вычисляется по формуле

$$Q = \eta Q_T \quad (39)$$

где  $\eta$  – объемный КПД насоса» [15].

#### **Давление и напор, развиваемые насосом:**

«Работа насоса в системе вызывает приращение удельной энергии жидкости, энергии, отнесенной к 1 кг массы жидкости. Полная удельная энергия перекачиваемой жидкости при входе в насос (сечение 1–1 на рисунке 8) составляет:

$$P_1 = z_1 g + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} \quad (40)$$

где  $z_1$  – расстояние центра тяжести сечения 1–1 от плоскости сравнения, м;

$p_1$  и  $v_1$  – давление, Па, и скорость жидкости, м/с, на входе в насос.

Полная удельная энергия при выходе (см. сечение 2–2 на рисунке 8).

$$P_2 = z_2 g + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} \quad (41)$$

где  $z_2$  – расстояние центра тяжести сечения 2–2 от плоскости сравнения, м;

$p_2$  и  $v_2$  – давление, Па, и скорость жидкости, м/с, на выходе из насоса.

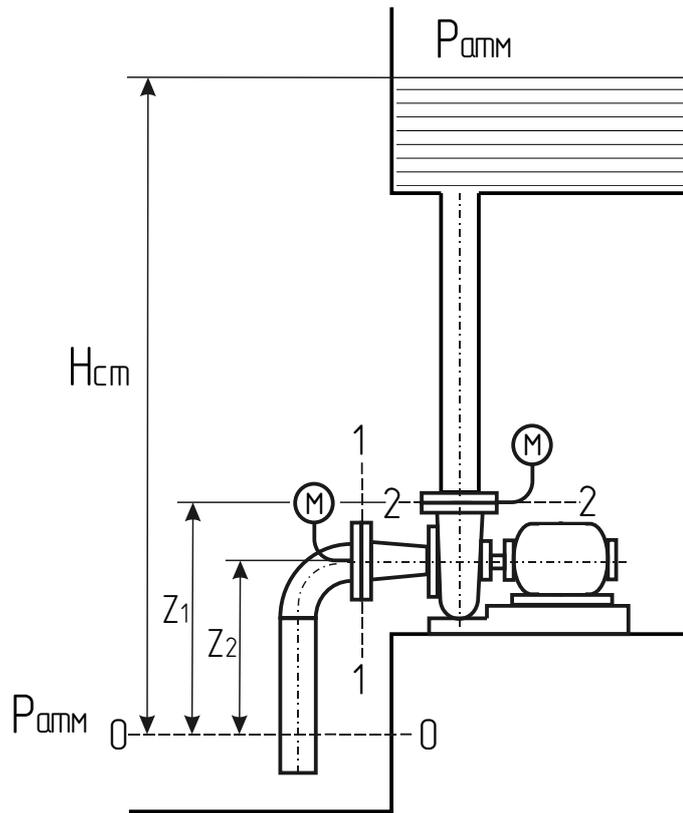


Рисунок 8 – Схема работы центробежного насоса

Приращение удельной энергии или полезная удельная работа составит:

$$P_2 - P_1 = \frac{p}{g} = (z_2 - z_1)g + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \quad (42)$$

откуда давление, развиваемое насосом,

$$p = (z_2 - z_1)\rho g + (p_2 - p_1) + \rho \frac{v_2^2 - v_1^2}{2}. \quad (43)$$

Для гидравлических расчетов применяется понятие напора, представляющего собой удельную энергию жидкости, отнесенную к единице ее веса и выраженную в метрах столба этой жидкости  $H = p/\rho g$ . Из соотношения (3.43) следует, что напор, развиваемый насосом, равен:

$$H = (z_2 - z_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}. \quad (44)$$

Манометрический напор есть сумма первых двух членов уравнения:

$$H_{\text{ман}} = (z_2 - z_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho g}, \quad (45)$$

т.е. напор насоса равен манометрическому напору плюс разность скоростных напоров во всасывающем и напорном патрубках насоса.

В действующих насосных установках манометрический напор

$$H_{\text{ман}} = K_M B_M + K_B B_B + \Delta z,$$

где  $K_M$  и  $K_B$  – коэффициенты пересчета;

$B_M$  и  $B_B$  – показания соответственно манометра и вакуумметра;

$\Delta z$  – расстояние между цапфами манометра и вакуумметра, м.

Если манометр и вакуумметр имеют шкалу, градуированную

в кгс/см<sup>2</sup>, то  $K_M = K_B = 10$ ;

в мм рт. ст., то  $K_B = 0,0136$ ;

в МПа, то  $K_M = 98,1$

в кПа, то,  $K_B = 0,0981$ .

При проектировании насосных установок напор, который должен развивать насос, определяют по формуле

$$H = H_B + H_H + h_B + h_H \quad (46)$$

где  $H_B$  и  $H_H$  – геометрическая высота всасывания и нагнетания;

$h_B$  и  $h_H$  – потери напора во всасывающем и нагнетательном трубопроводе» [17].

### 1.3 Характеристика центробежного насоса

«Графическая зависимость основных технических показателей (напора, мощности, КПД, высоты всасывания) от подачи при постоянных значениях частоты вращения рабочего колеса, вязкости и плотности жидкости на входе в насос называется **характеристикой насоса**» [33].

«Теоретические характеристики получаются, используя основные уравнения центробежного насоса, в которые вводятся поправки на реальные условия его работы. Истинные зависимости между параметрами работы центробежного насоса определяются экспериментально, в результате заводских (стендовых) испытаний насоса или его модели. Насосы испытываются на заводских испытательных станциях. Методика испытаний

насосов установлена ГОСТ 6134–71. Полученные опытные значения подачи  $Q$ , напора  $H$  и мощности  $N$ , а также вычисленные по этим величинам значения КПД наносятся на график и соединяются плавными кривыми. Обычно все три кривые наносят на один график с разными масштабами по оси ординат (рисунок 9). Характеристики насоса имеют несколько отличительных точек или областей. Начальная точка характеристики соответствует работе насоса при закрытой задвижке на напорном патрубке ( $Q = 0$ ). В этом случае насос развивает напор  $H$  и потребляет мощность  $N$ . Потребляемая мощность (около 30 % номинальной) расходуется на механические потери и нагрев воды в насосе. Работа насоса при закрытой задвижке возможна лишь непродолжительное время (несколько минут)» [23].

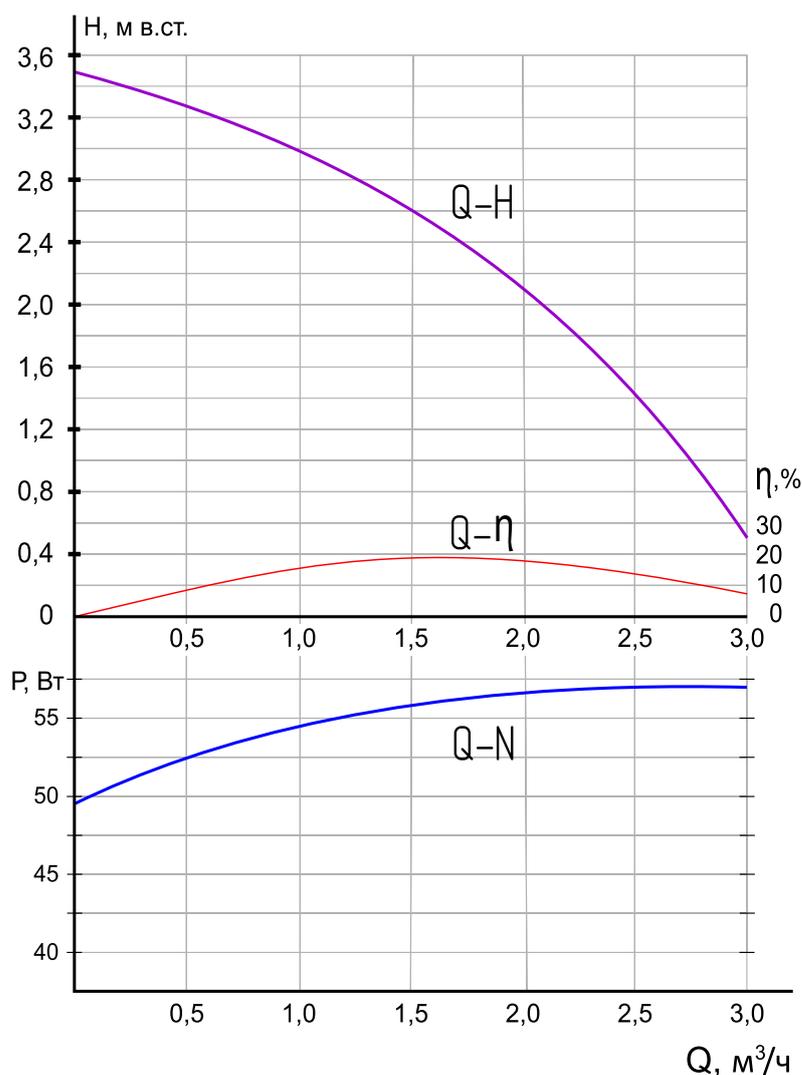


Рисунок 9 – Характеристика центробежного насоса

Оптимальная точка характеристики соответствует максимальному значению КПД. Так как кривая  $Q-\eta$  имеет в зоне оптимальной точки пологий характер, то на практике пользуются рабочей частью характеристики насоса, в пределах которой рекомендуется его эксплуатация. Рабочая часть характеристики зависит от допустимого снижения КПД, которое принимают, как правило, не более 2–3 % максимального его значения. Конечная точка кривой  $Q-H$  соответствует значению подачи, после которого, насос может войти в режим кавитации. Вид характеристики насоса зависит от его коэффициента быстроходности. Крутизна характеристики  $K$ , %, определяется:

$$K = \frac{H_0 - H_m}{H_m} 100 \quad (47)$$

где  $H_0$  – напор насоса при  $Q = 0$ ;

$H_m$  – напор при максимальном значении КПД.

При расчете систем водоснабжения с использованием компьютера необходимо иметь аналитические выражения для рабочих участков характеристик  $Q-H$  насосов. Обычно такая характеристика задается:

$$H = H_0 - S_n Q^2 \quad (48)$$

где  $H_0$  – напор, развиваемый при закрытой задвижке на подаче, ( $Q = 0$ );

$S_n$  – гидравлическое сопротивление насоса.

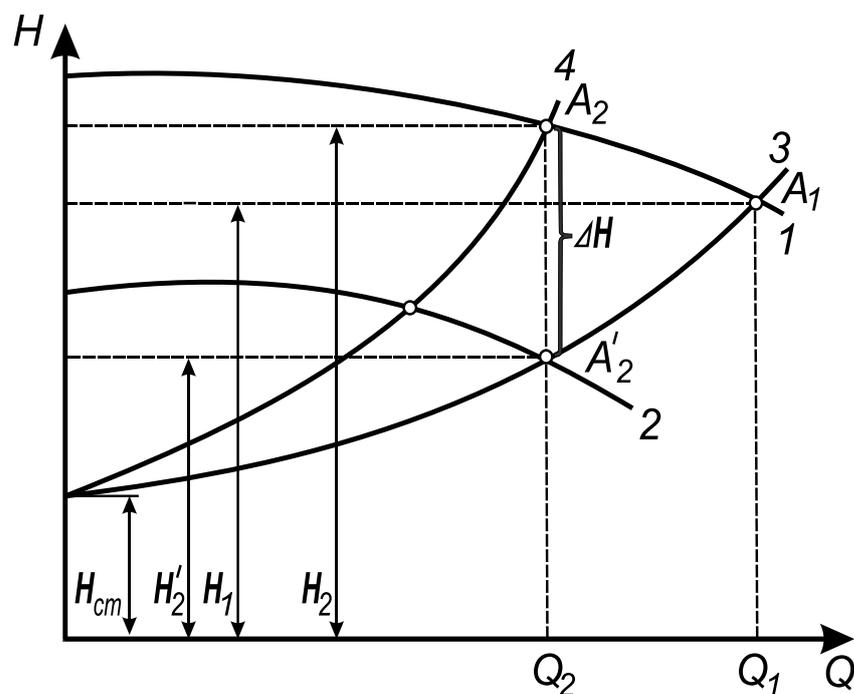
Эта формула приближенна и отображает фактическую кривую  $Q - H$  в узком диапазоне расходов. Формулы для определения  $H_0$  и  $S_n$  приводятся в инструкциях по выполнению гидравлических расчетов систем водоснабжения [34, 35].

#### **Режимы работы насосных установок:**

«С ростом водопотребления подачу приходится увеличивать. При этом увеличиваются потери давления в трубах. Чтобы компенсировать эти потери, следует увеличить давление, развиваемое насосной установкой. Приведение в соответствие водопотребления и подачи осуществляется путем изменения числа работающих насосных агрегатов, степени открытия задвижек на

напорных линиях, в настоящее время все чаще регулируется частота вращения рабочих колес насосов, с помощью частотно регулируемого электропривода» [5].

«Прикрывая или открывая затвор, изменяют крутизну характеристики  $Q-H$  трубопровода (рисунок 10), которая зависит от его гидравлического сопротивления. Прикрывая затвор, увеличивают крутизну характеристики трубопровода, при этом рабочая точка насоса  $A_1$  перемещается в положение  $A_2$ . В этом случае подача уменьшается до значения  $Q_2$ , напор, развиваемый насосом, возрастает до значения  $H_2$ , а напор на трубопроводе за затвором снижается до значения  $H_2'$ . Снижение напора за затвором происходит за счет потерь напора  $\Delta H$  в затворе» [8].



1 – характеристика  $Q-H$  насоса при номинальной частоте вращения; 2 – то же при уменьшенной частоте вращения; 3 – характеристика трубопровода при полном открытии затвора; 4 – то же при уменьшении степени открытия затвора;  $H_1$  – напор, соответствующий подаче  $Q_1$ ;  $H_{cm}$  – статическая составляющая напора.

Рисунок 10 – Регулирование режима работы центробежного насоса

«Анализ режима работы насосных установок выполняется с использованием характеристик насосов и трубопроводов. Для анализа режима работы установок с несколькими насосами, работающими параллельно или



обеспечения этого расхода, называется характеристикой трубопровода и описывается уравнением (48)

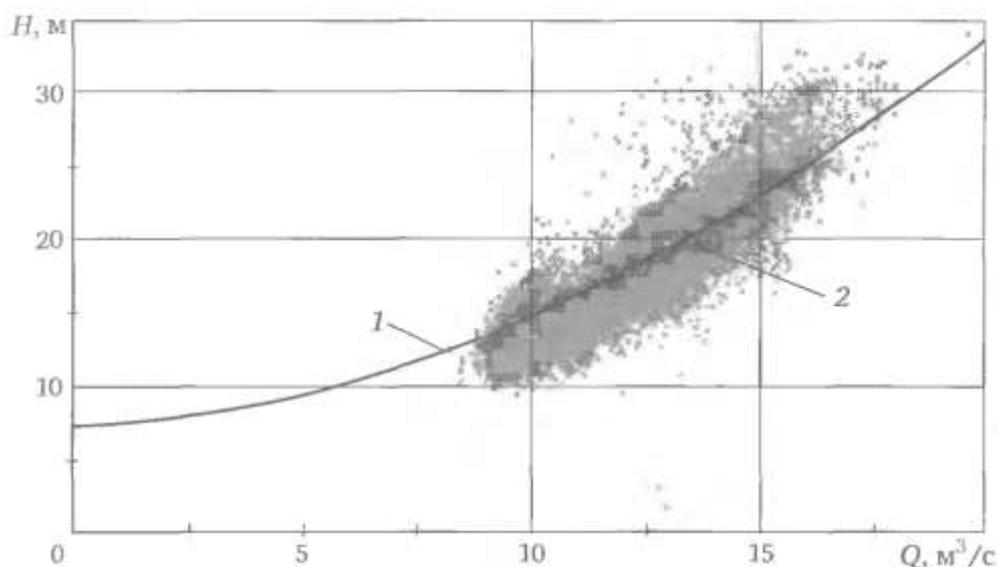
Графически характеристика трубопровода изображается отрезком параболы  $E$  (рисунок 11). Суммарная характеристика нескольких трубопроводов, соединенных последовательно, строится путем сложения ординат характеристик этих трубопроводов при одной и той же подаче (абсциссе), соединенных параллельно – путем сложения абсцисс характеристик трубопроводов при одинаковых ординатах (напорах).

Пересечение характеристик  $Q-H$  насоса и трубопровода (точка 5 на рисунке 11) определяет положение рабочей точки насоса. Координаты этой точки в плоскости  $Q-H$  соответствуют подаче и напору при данном режиме работы насоса и трубопровода» [14].

«Сложная конфигурация сети, изменение водопотребления во времени и в пространстве, сложный рельеф местности делают зависимость  $H_c=f(Q)$  неоднозначной. Вместо параболической кривой получается некая область случайных точек, характеризующих зависимость  $H_c = f(Q)$ » [26].

«На рисунке 12 показана реальная зависимость напора от подачи насосной станций. Одному и тому же значению подачи  $Q$  в разное время соответствуют разные значения напоров  $H_c$ . Так же одному значению напора  $H_c$  соответствуют разные значения  $Q$ . Для изучения режимов работы насосных установок совместно с сетью вводится понятие эквивалентная характеристика водопроводной сети» [32].

«Эквивалентная характеристика – усредненная зависимость требуемых напоров на напорном коллекторе насоса, обеспечивающих нормальную подачу. Нормальная подача – поддержание заданных значений напоров в контрольных точках сети, ниже которых они не должны опускаться в реальном диапазоне изменения водопотребления.



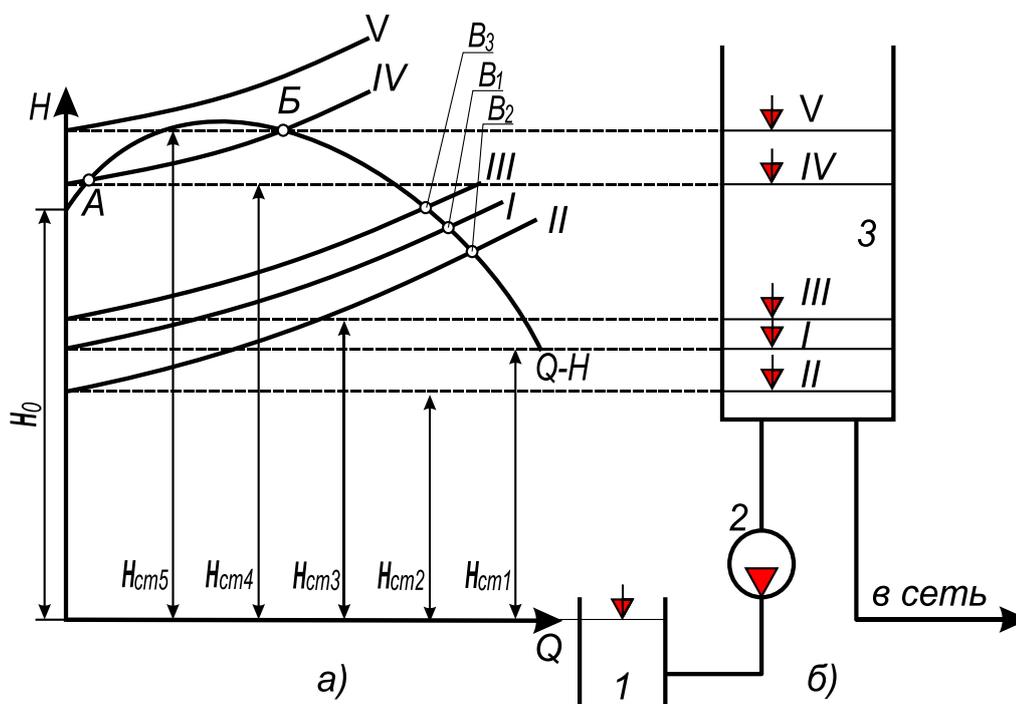
- 1 – эквивалентная характеристика сети (усредненная зависимость  $H_c=f(Q)$ );  
 2 – область расположения точек, характеризующих зависимость  $H_c = f(Q)$

Рисунок 12 – Эквивалентная характеристика водопроводной сети

Эквивалентная характеристика сети используется для определения общих показателей, характеризующих работу водопровода: экономия или энергопотребление для определения удельных норм расходования энергии за расчетный период или возможного диапазона изменения подачи или требуемых напоров на выходе из насосных станций.

Режим работы группы насосов определяется пересечением суммарной характеристики  $Q-H_{I+n}$  группы насосов с характеристикой трубопровода (системы трубопроводов). Этому режиму соответствует точка 2 с координатами: подача –  $Q_{I+II}$  напор  $H_{I+II}$  (рисунок 13).

Режим работы каждого из параллельно работающих одинаковых насосов определяется: через точку 2 проводится линия, параллельная оси абсцисс. Пересечение этой линии с характеристикой  $Q-N$  одного насоса в точке 1 определит рабочую точку одного из параллельно работающих насосов. Координаты точки 1 соответствуют расходу  $Q_I$  и напору  $H_I$  каждого из насосов. КПД насоса, соответствующий этому режиму, определяется ординатой точки 4 на пересечении кривой  $Q-\eta$ ) с перпендикуляром, опущенным из точки 1, а мощность, потребляемая одним насосом, ординатой точки 7 на пересечении кривой  $Q-N$  с тем же перпендикуляром.



*a* – график совместной работы насоса и трубопровода с резервуарами; *б* – схема насосной установки; 1 – приемный резервуар; 2 – насос; 3 – напорный резервуар; I–V – характеристики трубопровода, соответствующие I–V уровням в напорном резервуаре

Рисунок 13 – Устойчивость работы насоса

Работа насоса наиболее экономична, когда его подача и напор соответствуют максимальному значению КПД. Вместе с тем допускается некоторое отклонение рабочих параметров этих насосов от значений, указанных в каталогах. В насосах, характеристика  $Q-H$  которых состоит из двух ветвей, возрастающей и падающей (рисунок 13), возможно возникновение явления помпажа» [4].

### Потери энергии в насосных установках:

«Насосные установки работают с повышенным напором из-за увеличения гидравлического сопротивления системы трубопроводов, колебаний уровня жидкости в приемных и напорных резервуарах, а также из-за несоответствия режиму работы насосов режима притока или потребления жидкости. Повышение напора в результате изменения гидравлического сопротивления зависит от расхода жидкости и влияет на значение

динамической составляющей напора  $v^2/(2g)$ , развиваемого насосной установкой, изменяет крутизну характеристики трубопровода.

Одной из распространенных причин увеличения гидравлического сопротивления труб является их внутренняя коррозия, в результате которой снижается пропускная способность трубопроводов и возникает необходимость в повышении напора, создаваемого насосной станцией, чтобы при повышенном гидравлическом сопротивлении обеспечить подачу того же количества жидкости» [13].

«Вместе с коррозией источником дополнительного гидравлического сопротивления является низкое качество труб и небрежный монтаж трубопроводов. Трубы, изготовленные со значительными отклонениями от установленных размеров и геометрической формы, при соединении друг с другом образуют уступы, которые увеличивают гидравлическое сопротивление трубопроводов. Такой же отрицательный эффект создают сварочные швы, выполненные с низким качеством.

Источником возникновения дополнительного гидравлического сопротивления является также низкий уровень эксплуатации оборудования насосных установок и системы трубопроводов. Из-за невнимательности эксплуатационного персонала возможно неполное открытие затворов и задвижек. Имеют место случаи, когда после завершения ремонтных работ остаются закрытыми некоторые задвижки. Выявить источники повышения гидравлического сопротивления можно при плановых и выборочных внеплановых испытаниях водоводов, магистралей и отдельных трубопроводов сети. В ходе которых должны быть построены характеристики трубопроводов и сделано их сравнение с результатами расчетов и предыдущих испытаний» [13].

#### **1.4 Методика расчёта энергопотребления насосными установками**

«Электроэнергия, потребляемая насосными агрегатами, расходуется на подъем жидкости и преодоление гидродинамического сопротивления в трубопроводах. Кроме того, часть электроэнергии расходуется в самих

насосных агрегатах: на преодоление сил трения в сальниках и подшипниках насосных агрегатов, на нагрев магнитопровода и обмоток в электродвигателе, на его вентиляцию и пр» [8].

«Отношение полезно использованной в насосном агрегате электроэнергии к электроэнергии, полученной из электрической сети, характеризуется КПД агрегата. Для современных насосных агрегатов в зависимости от их мощности, назначения и других факторов значение КПД варьируется в пределах от 0,3 до 0,9. Мощность, кВт, потребляемая насосом, определяется по формуле:

$$N = 9,81 \frac{QH}{\eta_n} \quad (49)$$

где  $Q$  — подача насоса, м<sup>3</sup>/с;

$H$  — напор насоса, м;

$\eta_n$  — КПД насоса.

Мощность, кВт, потребляемая насосным агрегатом:

$$P = \frac{N}{\eta_{эд}\eta_{пр}} \quad (50)$$

где  $\eta_{эд}$  — КПД электродвигателя;

$\eta_{пр}$  — КПД преобразующего устройства.

Количество электроэнергии, потребляемой агрегатом за время  $t$ , ч, при работе с постоянной подачей и неизменным давлением определяется по формуле:

$$W = Pt \quad (51)$$

В реальных установках насосные агрегаты работают в переменном режиме, поэтому потребляемая мощность, меняется в течение некоторого времени. Использование формулы (51) ограничивается длительным в равномерным режимом работы» [8].

«Для определения количества электроэнергии, потребляемой насосом при работе в неравномерном режиме, разработаны методики, которые позволяют прогнозировать потребление электроэнергии.

На рисунке 14 представлен график совместной работы насоса и трубопровода, а также упорядоченная диаграмма (кривая распределения) подачи жидкости. Упорядоченная диаграмма подачи – кривая, соединяющая ординаты графиков подачи жидкости в порядке возрастания или убывания. Она может быть аппроксимирована уравнением прямой линии:

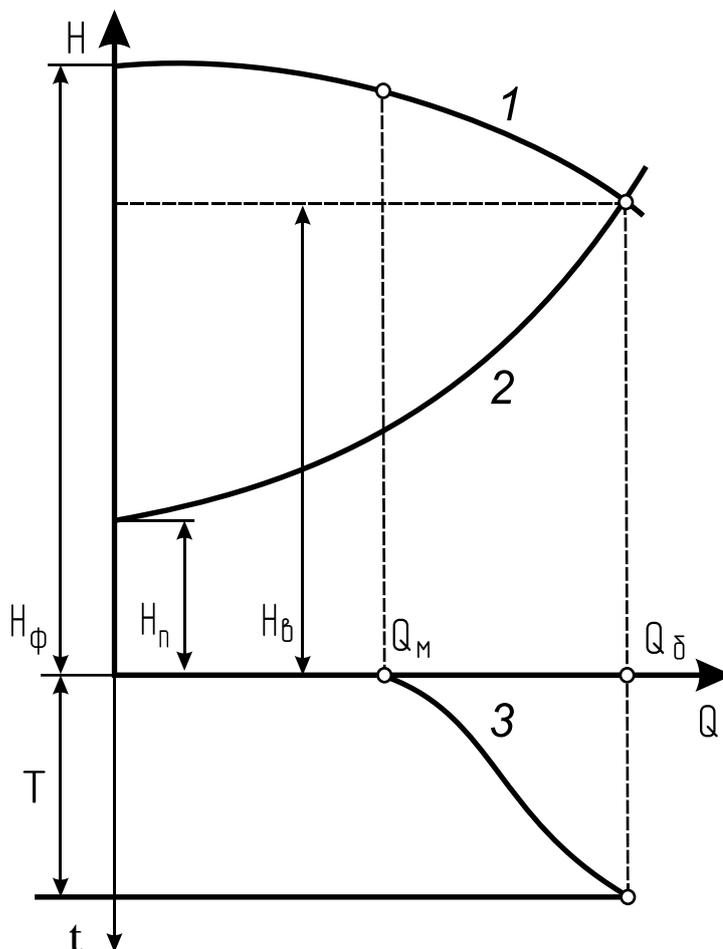
$$Q = Q_6 \left( (1 - \lambda) \frac{t}{T} + \lambda \right) \quad (52)$$

где  $Q_6$  – наибольшая подача за расчетный период;

$Q_M$  – наименьшая подача за расчетный период;

$\lambda$  – относительная минимальная подача,  $\lambda = Q_M/Q_6$ ;

$T$  – длительность расчетного периода.



1 – напорная характеристика насоса; 2 – характеристика трубопровода; 3 – диаграмма подач

Рисунок 14 – График совместной работы насоса с трубопроводом и упорядоченная диаграмма подачи

Из уравнений (49) и (52) получена зависимость потребляемой насосами мощности от времени, при условии, что насос работает без излишнего напора, т.е. рабочая точка насоса перемещается по характеристике трубопровода:

$$W = \frac{N_6 T (1 + \lambda)}{4 \eta_{эд}} ((1 + H_n) + \lambda^2 (1 - H_n)), \quad (53)$$

где  $N_6$  – мощность, потребляемая насосом при наибольшей подаче, кВт;  
 $H_{II} = H_n / H_6$  – относительное противодавление.

Мощность  $N_6$  вычисляется по формуле (3.49) при подстановке в нее значений наибольшей подачи  $Q_6$  и напора  $H_6$ , соответствующего этой подаче (рисунок 14). Уравнение (3.53) позволяет вычислить потребление энергии насосной установкой за расчетный период времени  $T$ . Погрешность вычислений вставляет  $\pm(10-15)\%$  [9].

«В зависимости от условий эксплуатации для каждой насосной установки норма энергопотребления отличается от среднего значения. Отличие вызвано тем, что высота подъема жидкости разных насосных установок различна. Удельные нормы расходования электроэнергии планируются не только на единицу объема поданной жидкости, но и на произведение массы поданной жидкости и развиваемого насосами напора. Эта норма потребления энергии обычно колеблется в пределах 3,3–4,0 кВт-ч/(т-м). Такой разброс значений для разных насосных установок обусловлен состоянием насосных агрегатов, а также гидравлическим сопротивлением всасывающих и напорных трубопроводов и арматуры насосных установок. С точки зрения энергетической оценки системы водоснабжения (насосной установки, водоводов и сети) использование норм энергопотребления в единицах кВт-ч/м<sup>3</sup> предпочтительней, чем в кВт-ч/(т-м). Принятие же в качестве норматива единицы кВт-ч/(т-м) создает иллюзию снижения расхода энергии в то время, как фактически она используется нерационально.

Объясняется это тем, что во втором случае норма энергопотребления, по сути, является величиной, обратной КПД насоса, поэтому она достаточно

объективно характеризует лишь состояние насосного агрегата, но не может характеризовать экономичность работы системы в целом» [3].

«Работа системы водоснабжения тем экономичнее, чем ниже напор в системе, поэтому удельная норма расходования энергии должна стимулировать принятие мер по снижению напора. К числу таких мер относится: регулирование угловой скорости насосов в соответствии с изменением режима водопотребления, очистка внутренних поверхностей труб, покрытие внутренних поверхностей труб необрастающими составами и др.» [3].

#### **Учет расхода электроэнергии:**

«Электроэнергия, потребляемая насосными агрегатами, измеряется счетчиками активной и реактивной электрической энергии. Измерение потребляемой электроэнергии с помощью счетчиков дает наиболее достоверную информацию о фактическом её потреблении. Использовать для этих целей косвенную информацию (ток нагрузки агрегатов, количество часов работы агрегатов и номинальную мощность электродвигателей) недопустимо. Для определения фактических удельных расходов электроэнергии на перекачку жидкости необходимо оборудовать насосную станцию датчиками расхода, давления, температуры.

Для прогнозирования потребления электроэнергии вновь строящимися и проектируемыми насосными станциями используются расчетные методы. Расчетные методы позволяют, кроме того, сравнить фактические затраты электроэнергии с ее научно обоснованным потреблением и тем самым выявить возможные пути ее экономии» [7].

«Определение фактических удельных расходов электроэнергии на подачу, кВт-ч/м<sup>3</sup>:

$$W_{y\partial} = W/Q, \quad (54)$$

где  $W$  – расход электроэнергии за расчетный период  $T_p$ , кВт-ч;

$Q$  – подача воды за время  $T_p$ , м<sup>3</sup>.

Расчетные периоды  $T_p$  должны быть достаточно длительны (для системы водоснабжения – неделя), поскольку за это время происходят наиболее характерные изменения в режиме работы насосных установок.

Зная фактический удельный расход электроэнергии, можно оценить целесообразность мероприятий по экономии электроэнергии. Для этого определяется удельный расход электроэнергии, вычисленный по результатам измерения до проведения мероприятий  $W_1$  и  $W_2$  после, фактическая экономия электроэнергии за год будет равна:

$$W_{y\partial} = W_1 - W_2 / Q_t \quad (55)$$

где  $Q_t$  – объем перекачки за год» [7].

### **Вывод по главе 1:**

Наиболее распространенной причиной увеличения гидравлического сопротивления труб является их внутренняя коррозия, в результате которой снижается пропускная способность трубопроводов и возникает необходимость в повышении напора, создаваемого насосом, чтобы при повышенном гидравлическом сопротивлении обеспечить подачу того же количества жидкости, что в свою очередь приводит к увеличению энергозатрат.

## **Глава 2 Системы автоматизированного управления насосных станций**

Автоматизация – это совокупность целого набора теорий и методов, позволяющих заставить систему работать автоматически по назначению, в нашем случае городскую систему водоснабжения. Важнейшей особенностью автоматизации является принцип обратной связи: датчик измеряет определенную переменную, например, давление; компьютер проверяет правильность измерения; компьютерный алгоритм вычисляет и решает, что следует исправить; насос, клапан или какое-либо другое устройство преобразует решение в действие. Все это нетронуто человеческой рукой. Намерение, или цель, должно быть предоставлено контролеру. Ключевым компонентом автоматизации является система, которая может представлять собой любой компонент или процесс в системе водоснабжения и даже всю систему целиком. Технологии автоматизации всегда должны сочетаться с истинным пониманием людей на всех уровнях. В противном случае велик риск недоразумений и неудач. Выделяются три категории проблем, в решение которых автоматизация может внести свой вклад: неопределенность, обратная связь и сложность. Ключевой проблемой является работа с возмущениями. Для обеспечения устойчивого функционирования городских районов в будущем потребуется комплексное управление всем городским водным циклом. Автоматизация является важнейшим условием интеграции сложных систем.

### **2.1 Область применения систем автоматизации**

Системы автоматизированного управления (САУ) насосных станций предназначены для автоматической работы, защиты и управления технологическим оборудованием насосной станции. Они поддерживает оптимальный режим работы независимо для каждого насосного агрегата. Работа может осуществляться локально на насосной станции или через телеметрическую систему с других объектов, например, с центрального диспетчерского пункта (рисунок 15).

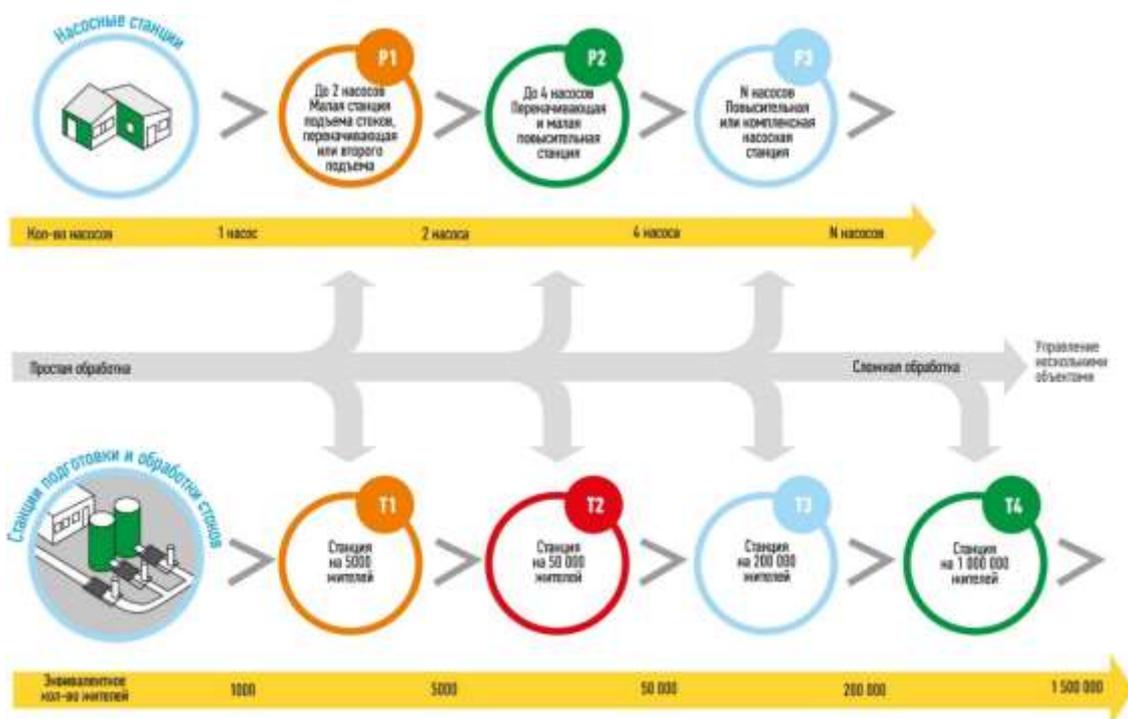


Рисунок 15 – Архитектура станций подготовки питьевой воды и обработки сточных вод

Системы автоматизированного управления насосных станций предназначены для обслуживания следующих устройств и агрегатов:

- насосная станция (состоит из основных насосных агрегатов с электродвигателями, дожимных насосных агрегатов с электродвигателями, входных/выходных автоматизированных клапанов основных и дожимных насосных агрегатов);

- автоматические клапаны;
- автоматическая система регулирования давления на выходе;
- управление потоком воды в распределительных коллекторах;
- системы смазки подшипников насосных агрегатов;
- система вентиляции насосного помещения;
- система электрической поддерживающей вентиляции помещения;
- система откачки утечек.

**Основные характеристики:**

Системы автоматизированного управления насосных станций выполняют функции по автоматическому контролю всех необходимых

технологических параметров, состояния оборудования и параметров внутренней среды:

- автоматической защите технологического оборудования;
- независимого поддержания оптимальных режимов работы основного и вторичного технологического оборудования;
- управление оборудованием в соответствии с командами оператора;
- обнаружение отказов оборудования и сбоев выполнения команд оператора;
- визуализация и регистрация основных технологических переменных и параметров, характеризующих состояние оборудования при нормальной эксплуатации, техническом обслуживании и пуско-наладке;
- обработка и передача данных в телеметрическую систему.

### Структура:

Системы автоматизированного управления имеет централизованную трехуровневую архитектуру (рисунок 16).



Рисунок 16 – Структура системы автоматизированного управления

САУ отвечает типовым требованиям к системам управления:

- высокая надежность благодаря распределенной самодиагностике и резервированию критических блоков;
- простота использования благодаря программированию процессов и объектно-ориентированному управлению;
- интеграция разнообразных каналов сбора данных в единую систему.

Системы автоматизированного управления обладают рядом преимуществ, которые позволяют использовать их всё в более широком диапазоне применения. Ниже приведён пример наиболее значимых характеристик САУ.

**Гибкость:** Система может комплектоваться модулями, позволяющими решать различные задачи автоматизации.

**Многосторонность:** Система имеет совместимость с многочисленными зарегистрированными устройствами различных производителей.

**Функциональность:** Компоненты системы обеспечивают дополнительные режимы работы (имитация, тестирование и маскировка) и другие функции, такие как защита от несанкционированного доступа и протоколирование событий для контроля действий персонала.

## **2.2 Проблемы автоматизации систем водоснабжения**

В нашей урбанизированной жизни мы легко забываем о нашей связи с природой и зависимости от нее. С ростом населения и урбанизации, повышением спроса со стороны промышленности и производства продовольствия, усилением изменения климата и более неустойчивым характером осадков баланс между водопользованием человека и природой оказывается под угрозой. Это оказывает глубокое влияние не только на водоснабжение и очистку, но и на спрос на более эффективное использование воды в быту, в промышленности и сельском хозяйстве. Тесная связь между

водой и энергией оказывает влияние как на водные, так и на энергетические структуры.

Технологии автоматизации должны играть значительную роль в будущих городских системах водоснабжения. Однако подчеркнем, что это лишь часть ответа. Если технология не будет сочетаться с подлинным пониманием людей – как внутри водоканалов, так и среди пользователей и потребителей, – то достичь целей устойчивого развития будет чрезвычайно трудно. Технологии и системы автоматизации – это просто инструменты организации, людей и бизнес-решений.

Осознание того, что вода имеет фундаментальное значение для жизни, должно оказывать искреннее влияние на то, как мы добываем, обрабатываем, используем и возвращаем воду природе. Если воды много, мы редко обращаем внимание на дисбаланс в природе. Должно быть какое-то управление водой, которое гарантирует, что городской и природный водные циклы работают вместе плавно и без разрушения ценностей в любом месте. Нам необходимо лучше понять взаимосвязь между городскими водными системами и окружающей природой не только в общем или глобальном плане, но и в каждом конкретном месте. Таким образом, водный сектор должен быть готов ко всем сопутствующим последствиям изменения климата, где вода является основным показателем. Выражаясь словами британского телеведущего и натуралиста сэра Дэвида Аттенборо: "... прежде всего это потребует изменения перспективы. Переход от рассмотрения природы как чего-то необязательного или "приятного иметь" к единственному величайшему союзнику, который у нас есть в восстановлении равновесия в нашем мире".

Некоторые из проблем, с которыми сталкивается любая городская система водоснабжения, где автоматизация должна играть определенную роль, включают:

Интеграция: Существуют значительные риски, связанные с устаревшим силосным мышлением, где никто не видит всей картины, никто не несет ответственности, где невозможно объединить бюджеты и принятие решений

слишком фрагментировано. Мы должны рассмотреть всю нашу водную систему, включая использование воды для других целей, не только сельское хозяйство и промышленность, но и экологическое качество пресноводных систем и океанов. Автоматизация не только демонстрирует необходимость интеграции, но и делает ее возможной.

**Управление активами:** Многие системы водоснабжения существуют уже 50-100 лет. Автоматический мониторинг активов – это экономически эффективный способ продолжения их службы и устойчивого обновления.

**Снижение энергопотребления:** Путем применения мониторинга и контроля. Она также открывает возможности управления и использования децентрализованных установок, использования возобновляемых источников энергии и рассмотрения экономических и социальных вопросов.

**Исходная вода:** защита качества воды является основной проблемой для любого водоснабжения. Автоматизация должна играть все большую роль в обеспечении безопасной воды с использованием контроля и контроля качества в режиме реального времени.

### **Технологическое развитие:**

Приборостроение, управление и автоматизация (САУ) привлекли внимание отрасли водоснабжения и водоотведения в начале 1970-х годов и в настоящее время широко распространен во всех видах водных операций. На сегодняшний день основной функцией САУ является поддержание эффективной работы очистных систем, достижение желаемой производительности при доступной стоимости, при наличии больших колебаний нагрузок и в то же время соблюдение экологических стандартов. В последние годы все большее внимание уделяется использованию микроконтроллеров для повышения потенциала существующих систем и повышения их способности справляться с внешними возмущениями или внутренними неисправностями. В этом контексте отдельный завод больше не рассматривается как самостоятельная единица, а как узел в сетевидной архитектуре, в которой его работа согласована со всеми другими единицами.

Развитие технологий сегодня должно оказать глубокое влияние на работу систем водоснабжения. Недорогие сенсоры и недорогие, но мощные микрочипы окажут огромное влияние на перспективные измерения. Информационные технологии, как комплексное решение, вместе с большой емкостью хранилища данных делает доступными огромные объемы данных. Сбор и использование больших объемов данных никогда еще не были столь масштабными в городских системах водоснабжения. Это, в свою очередь, требует быстрых вычислений, например, вычислений облачных, необходимых для обработки больших данных. Кроме того, расширенная аналитическая обработка данных развивается с помощью машинного обучения и искусственного интеллекта (ИИ).

### **2.3 Основные принципы систем автоматизации**

Автоматизацию можно определить, как использование машин и компьютеров, которые могут работать без участия человека. Термин "автоматизация" часто упоминается без какого-либо конкретного определения. Для некоторых людей автоматизация означает программирование программируемого контроллера. Для других это автоматическое управление единичным процессом или система диспетчерского контроля и сбора данных. Тем не менее для других это означает, что некоторая информация представлена на экране. От самых простых до самых сложных приложений автоматизация присутствует во многих формах в нашей повседневной жизни. Бытовые термостаты являются простыми примерами, в то время как мобильные телефоны гораздо сложнее. Скоро мы увидим самоуправляемые автомобили, которые находятся на передовой автоматизации. Автоматизация-это скрытая технология в том смысле, что кажется, что мы не замечаем ее, когда она работает. Его наблюдают только тогда, когда он не работает.

Автор утверждает, что человек по-прежнему является самой важной частью автоматизации. Парадокс автоматизации заключается в том, что чем эффективнее автоматизированная система, тем более важным будет человеческий вклад операторов. Бейнбридж (1983), когнитивный психолог, обсуждал способы, с помощью которых автоматизация производственных процессов может расширяться, а не устранять трудности для человека-оператора. Люди менее вовлечены, но их участие становится более критичным. Если автоматизированная система имеет ошибку, она будет умножать эту ошибку до тех пор, пока она не будет исправлена или система не будет закрыта. Это также потребует, чтобы и проектировщики, и операторы должны были приобрести новый и более многогранный способ мышления.

Системы автоматизации относятся ко многим дисциплинам, что, вероятно, и является причиной того, что существует так много различных определений автоматизации. Каждый профессионал увидит вызов автоматизации со своей собственной платформы и опыта. Поэтому легко запутаться в самом размере темы. Имеет ли это отношение к вызову автоматизации научная дисциплина? Возможно, самой важной особенностью автоматизации является то, что для достижения функционирующей системы необходимо объединить множество различных дисциплин, но научным образом. Еще одной привлекательной особенностью автоматизации является то, что один и тот же методологический инструментарий, разработанный в теории систем, может быть использован во многих различных областях, от автомобильной, до авиации, химической промышленности и экологических процессов.

Процесс автоматизации технологического процесса можно условно разделить на основные вопросы, которые решает современная наука и техника:

- Измерения: сенсорная и приборная техника;
- Коммуникационные технологии;
- Анализ и обработка сигналов, математическая статистика;

- Технология баз данных и разработка программного обеспечения;
- Инженерия управления;
- Теория оптимизации;
- Компьютерные системы реального времени;
- Технологический процесс, динамическое моделирование и моделирование: микробиология, химия воды, химический и биологический технологический процесс, реакторная технология, гидравлика и т.д.;
- Приводы: силовая электроника, системы электропривода, клапанная техника и взаимодействие человека и машины.

Отдельный специалист в любой из этих областей обычно не может в одиночку решить большую задачу автоматизации. Это требует тесного сотрудничества между людьми, а также комплексного взгляда на все различные методы, процессы, инструменты и методы, которые должны быть использованы. Здесь мы попытаемся показать, как различные области могут быть систематически объединены. Возможно, самая большая проблема заключается в том, чтобы сформулировать цель задачи автоматизации. Часто существуют противоречивые цели, которые должны быть сопоставлены друг с другом. Когда это сделано, остается задача распознать доступные методы и теории для решения проблемы. Здесь подчеркиваются три аспекта автоматизации в системе городского водного цикла: неопределенность, обратная связь и сложность.

Неопределенность в процессе или в окружающей его среде является основной мотивацией для автоматизации. В обрабатывающей промышленности (включая водную) инженер-контролер часто сталкивается с двумя проблемами со стороны своих коллег, не занимающихся контролем. Инженер-проектировщик процесса спрашивает, зачем нужен контроль. Можно спроектировать устройство или агрегат так, чтобы качество продукции всегда было удовлетворительным. Инженер по эксплуатации спрашивает, почему система управления несовершенна. - Этот контроллер неисправен! Концентрация циклична непрерывно.

Первая проблема может быть легко объяснена: оборудование не будет оставаться точно таким, каким оно было спроектировано; внешняя нагрузка будет изменяться, или услуги снабжения (поток воздуха, дозировка химических веществ и т.д.) не всегда будут постоянными. Вдобавок ко всему, есть нарушения в работе оборудования, такие как поломки или липкие клапаны. Пусковая фаза отличается от непрерывной работы.

Второй вызов может быть сложнее ответить: это может быть неприятная система для контроля. Коэффициент усиления может быть нелинейным, что указывает на то, что процесс – его временное поведение и чувствительность – ведет себя по-разному при низких и высоких нагрузках. Например, гидравлическое поведение в трубе может изменяться со временем, когда поверхность трубы покрывается окалиной. Может быть большое время простоя, что означает, что реакция от датчика запаздывает, или что результат управляющего воздействия не может быть замечен до тех пор, пока не пройдет определенный период времени. Управляющее действие обычно ограничено: клапан не может открываться более чем на 100%, а расход не может быть отрицательным или превышать номинальную мощность насоса.

Беспорядки повсюду и являются главной причиной контроля. Ниже мы обсудим основные нарушения в городской системе водоснабжения. Ни одно измерение не является совершенным, поэтому информация, которую мы получаем, должна быть воспринята с солью. Амплитуда может быть смещена из-за неправильной калибровки прибора. Сигнал может изменяться из-за внутреннего шума в датчике. Кроме того, сам процесс подвержен нарушениям. Существует целая отрасль математической статистики, которая была разработана для решения такого рода проблем.

**Принцип обратной связи:** Контур обратной связи имеет цель заставить систему вести себя желаемым образом, несмотря на возмущения. Контроллер воспринимает поведение системы, сравнивает его с желаемой реакцией (целью), вычисляет корректирующие действия и приводит систему в действие, чтобы осуществить желаемое изменение. Этот основной контур обратной

связи восприятия, вычисления и приведения в действие является центральным понятием в управлении (рисунок 17).



Рисунок 17 – Принцип обратной связи

Обратная связь – это сердце управления и автоматизации. Мы используем обратную связь более или менее сознательно каждую минуту нашей жизни. Информация от наших ног и датчиков равновесия поступает в наши мышцы, чтобы мы могли ходить или стоять. Уровень кислорода в крови поступает обратно в нашу дыхательную систему, чтобы мы могли двигаться. Вождение автомобиля связано с большим количеством обратной связи. 'Цель' состоит в том, чтобы держать машину на дороге и избегать препятствий. Водитель следит за тем, чтобы положение и скорость автомобиля находились в заданных пределах. Глаза следят за приборами и окружающей средой и ищут изменения или "возмущения". Они требуют, чтобы скорость или направление все время корректировались. Мозг обрабатывает "измерительные" данные и решает, как изменить скорость и направление. Решение ("управляющий сигнал") передается мышцам ('исполнительным механизмам"), которые будут поворачивать руль или акселератор. Хороший водитель также смотрит вперед и может обнаружить препятствие далеко впереди и скорректировать скорость или направление, чтобы избежать проблемы. Это называется *прямой* связью.

Контроль с обратной связью-это мощный инструмент. Это позволяет ослабить влияние возмущений и вариаций процесса. Он может трансформировать плохо работающие компоненты в хорошие системы и стабилизировать нестабильные системы. Другими словами, цель контроля

состоит в том, чтобы заставить систему вести себя желаемым образом, несмотря на возмущения.

Иногда возмущение можно измерить до того, как оно попадет на растение. Затем информация может быть *передана* для подготовки завода. Например, измерение качества в источнике воды передается в насосную систему на очистную установку. Чтобы сделать коррекцию до того, как она попадет на завод, обычно требуется модель, которая, однако, редко бывает идеальной. Поэтому в основном рекомендуется сочетать прямую связь с обратной связью. Первый осуществляет раннюю коррекцию, в то время как второй обеспечивает точность, что цель достигнута.

Иногда контроллер работает автоматически, как и в большинстве устройств. Иногда контроллер-это человек, как в управленческих решениях. Простые системы требуют только одного контура обратной связи, и желаемая производительность кажется простой. Однако довольно часто приходится идти на компромиссы, например, подавлять шум в сигналах, но при этом эффективно распознавать и отклонять помехи. В более сложных случаях производительность должна контролироваться и оцениваться, чтобы можно было начать процесс обучения. В этом контексте машинное обучение и ИИ предоставляют инструменты для обучения, чтобы система управления могла улучшить свою производительность на основе своих прошлых записей. Машинное обучение применяется для очистки сточных вод описывают решения на основе искусственного интеллекта для водного сектора.

Управление процессом можно определить как сохранение процесса в его текущем состоянии или изменение процесса из одного состояния в другое. Поддержание процесса в желаемом состоянии, несмотря на возмущения, является наиболее распространенной формой контроля в водных системах. Перемещение процесса из одного состояния в другое называется управлением состоянием, которое может быть необходимо для перехода процесса от нежелательной работы к более безопасной. Решающее значение имеет определение правильной цели (показателя эффективности), т. е. оценка

последствий контрольного действия. В зависимости от выбранного индекса производительности результирующая операция может сильно отличаться.

Задача измерения – это вопрос приборостроения, а задача привода – вопрос реализации решения в физической силе, движении или крутящем моменте с использованием приводов, таких как электродвигатели или пневматические клапаны. Алгоритм управления может варьироваться от простого алгоритма включения-выключения с одним входом и одним выходом до сложной системы с множеством входов и выходов. В большинстве единичных процессов водных систем алгоритмы управления относительно просты. Проблема возрастает, когда операции должны быть интегрированы.

Принципы обратной связи и прямого контроля применимы вплоть до принятия стратегических решений на высоком уровне. Структура всегда одна и та же, тогда как измерения, анализы и решения различны. Следовательно, жизненно важно понять этот способ мышления, чтобы коммунальные службы стали умнее, надежнее, устойчивее, эффективнее, эффективнее и, самое главное, более устойчивыми.

#### **2.4 Системные аспекты автоматизации городской системы водоснабжения**

В то время как технология отдельных процессов и компьютерных систем получила огромное развитие, до сих пор существует неполная картина системных аспектов объединения и координации всех процессов и компонентов в единую городскую систему водоснабжения. Это включает в себя мониторинг и обработку возмущений в различных частях системы, координацию действий по устранению крупных краткосрочных или долгосрочных возмущений. Системные аспекты становятся сложными из-за неопределенностей и возмущений, огромных объемов данных, множества уровней принятия решений и широкого диапазона временных масштабов. Проблемы становятся еще более очевидными, если решения – автоматические

или ручные – должны быть быстрыми, требующими достаточно полной информации. Автоматизация должна иметь дело с комбинацией потоков информации, материалов и энергии в водной системе.

Рисунок 18 иллюстрирует ключевые части информационного потока в автоматизированной системе. Все они включены в петлю обратной связи. В принципе, все детали могут быть как автоматическими, так и ручными. Измерение может также проявляться в виде наблюдений, связь может осуществляться людьми или различными физическими каналами связи, управление может осуществляться в виде автоматических или человеческих решений, а исполнительные механизмы могут быть машинами или человеческим вмешательством.



Рисунок 18 – Типовая структура промышленной системы автоматизации

## 2.5 Наблюдение за системой водоснабжения

Часто можно измерить внешние возмущения в городской системе водоснабжения, чтобы обеспечить раннее предупреждение о работе системы. Некоторые помехи также могут быть ослаблены соответствующими автоматическими управляющими воздействиями.

Адекватное приборостроение является основным условием контроля. В водных системах очевидно, что расход воды и множество концентраций и параметров качества являются основой для всех операций. Приборы должны быть надежными, простыми в обслуживании и экономичными. Это еще более важно в беспилотном процессе.

Датчики и приборы значительно улучшились за последние десятилетия, но все еще существуют ограничения датчиков, особенно для мониторинга и защиты качества воды в режиме онлайн. Существует развитие в направлении "умных" датчиков с несколькими головками, которые могут быть размещены в любом месте процесса. Внедрение датчика на заводе или в системе требует не только доверия к оборудованию. Если значение измерения не считается выгодным, то слишком легко потерять интерес к датчику. Затем производительность измерения будет постепенно снижаться из-за недостатка внимания или технического обслуживания. Слишком много высококачественных инструментов вышли из строя из-за отсутствия связи с целью получения информации. Кроме того, управляющие водными ресурсами могут быть более готовы поддерживать инвестиционные затраты, а не расходы на техническое обслуживание. Такое отношение должно быть оспорено, поскольку плохое техническое обслуживание приводит не только к низкой производительности, но и в конечном итоге к потере вложенных денег.

Прежде чем мы даже подумаем о контроле качества воды, необходимо убедиться, что оборудование завода работает должным образом. Если будет замечен какой-либо сбой в работе, обслуживающему персоналу следует подать автоматическую тревогу. Это включает в себя измерители частоты вращения электродвигателей, измерения акустического шума и индикаторы, которые могут гарантировать, что насосы работают. Простые измерения

уровня или гидравлические измерительные датчики могут подтвердить, что уровни и расход бака находятся в допустимых пределах (рисунок 19). Подчеркивать важность "поддержания завода в рабочем состоянии" - это *не значит подчеркивать важность "поддержания завода в рабочем состоянии"*. для получения точной информации о состоянии завода, но для обеспечения последовательных основных операций.

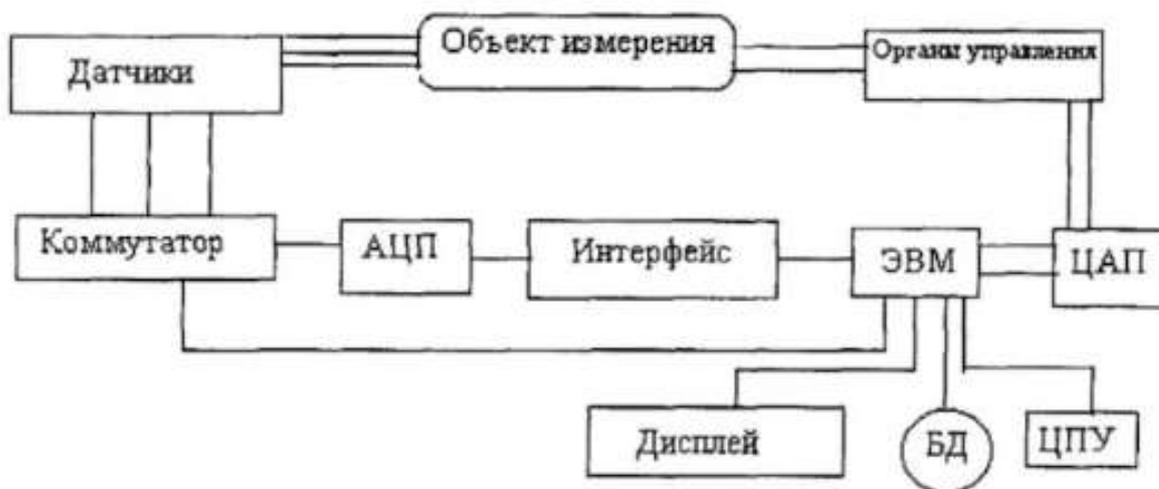


Рисунок 19 – Обобщенная схема автоматизированного измерения

Ключевыми измерениями в системах водоснабжения являются:

- *Гидравлические измерения*: параметры распределительной системы, использование потребителем, расход, уровень воды, уровень ливневой воды и давление.

- *Измерения качества питьевой воды*: мутность, свободный хлор, рН, содержание органических веществ, UV254/общий органический углерод, окислительно-восстановительный потенциал, проводимость, температура, цвет и озон. Другими важными измерениями являются патогенные микроорганизмы, побочные продукты дезинфекции (канцерогенные) и химические вещества, вызывающие растущую озабоченность.

- *Водоемы*: качественные и гидравлические измерения в реках, озерах, водно-болотных угодьях и водохранилищах.

Ожидается, что вскоре появятся недорогие устройства для контроля пропускания, общего количества взвешенных твердых частиц, размера частиц и распределения частиц по размерам, а также мутности, а также отдельных органических и неорганических химических компонентов. Концерн Capodaglio в 2017 году провел обзор существующего и ожидаемого онлайн-мониторинга для измерения содержания загрязняющих веществ в воде. Хемосенсоры, как альтернатива традиционным анализаторам, могут выдавать измеряемые значения в режиме реального времени. Биосенсоры являются перспективной основой для получения информации о качестве воды. Был достигнут прогресс в измерении патогенных бактерий, в то время как биосенсоры для вирусов и грибов все еще являются довольно сложной задачей. Более подробную информацию о свойствах датчиков можно найти как на сайтах поставщиков (поиск по "датчикам воды и сточных вод" и аналогичным ключевым словам).

## **2.6 Некоторые аспекты цифровизации автоматизированного управления**

Цифровизацию иногда называют новым явлением. Однако автоматизация стала важной частью истории и началась в 1970-х годах, когда оборудование и процессы стали управляться компьютером. В последние годы цифровизация включила в себя множество операций. Таким образом, люди, помимо инженерии, подверглись воздействию, создав гораздо больше внимания к развитию. Цифровизация будет влиять на персонал, коммунальные организации, лиц, принимающих решения, а также на потребителей. Она сводится к принятию обоснованных решений как для коммунального предприятия, так и для потребителя.

Индустрия 4.0, или четвертая промышленная революция, – это собирательный термин для обозначения технологий и концепций в области автоматизации, информационных технологий обрабатывающей

промышленности и производственных технологий. Эта концепция включает в себя такие стимулирующие технологии, как Интернет вещей, облачные вычисления и машинное обучение. Это означает, что каждый продукт или часть процесса несет в себе информацию, так что завод может организоваться, если правильно связан с другими единицами сети. Две параллельные разработки сделают водную отрасль чрезвычайно богатой данными: недорогие датчики в рамках информационно-коммуникационные технологии, которые формируют инфраструктурную основу для инновационных технологий.

Операции городского водного цикла должны быть более интегрированными, требующими как моделей количества, так и моделей качества воды. Энергетические и массовые балансы необходимы для городского цикла водоснабжения-от забора, очистки и распределения воды до поведения потребителей. Возможность собирать информацию и передавать ее с удаленных устройств и коррелировать эту информацию между различными системами поможет нам создать модели прогнозирования и предупреждения в режиме почти реального времени. Еще больше будет подчеркнута необходимость обеспечения качества данных. Что измерять и где измерять, должны быть темы для столь необходимых исследований.

## **2.7 Обнаружение системных аномалий**

Обнаружение системных аномалий (*мониторинг*) – это отслеживание рабочего состояния процесса или машины с помощью интерактивного инструментария (рисунок 20).



Рисунок 20 – Обнаружение системных аномалий

Анализируя данные измерений, можно сократить время обнаружения аномалий, например, при утечках, отказах компонентов или кражах воды. Это позволит уменьшить потери воды, загрязнение или энергетические отходы.

Любая система мониторинга должна определять, являются ли полученные данные значимыми и правильными, что делает скрининг данных необходимым. Как минимум, она должна включать сравнение нормального диапазона (высокие и низкие пределы), скорость изменения и дисперсию. Методы фильтрации низких частот необходимы для устранения шума при сохранении необходимой информации о сигнале. Фильтры высоких частот могут обнаруживать внезапные или быстрые изменения. Более сложные методы мониторинга опираются на инструменты искусственного интеллекта,

например, путем сравнения наблюдаемого поведения с "типичными" паттернами аналогичных единиц. Фирма Tinelli & Juran [28] предлагает прикладной ИИ-мониторинг для раннего обнаружения химического и/или биологического загрязнения.

Мониторинг также может быть достигнут с помощью динамического моделирования, использующего данные в реальном времени из нескольких источников, так называемых цифровых близнецов. Эта идея отнюдь не нова и была применена в управлении ядерными реакторами уже в 1990-х годах для руководства операторами до того, как были выполнены какие-либо перемещения стержней управления в активной зоне. Даже если цифровые близнецы являются многообещающими инструментами для принятия решений в режиме онлайн, все еще требуется много разработок, чтобы справиться со сложностью моделей, неопределенностью и требованиями к данным.

Несколько книг и статей по элементарному анализу данных можно свободно загрузить из Интернета (поиск по "анализу данных", "статистическому анализу данных" и "интеллектуальному анализу данных"). Существует множество свободно доступных, а также коммерческих программ для анализа данных. Программное обеспечение, такое как Excel, полезно для элементарного анализа данных, в то время как программные продукты, такие как Matlab (<http://se.mathworks.com/>), SAS (<http://www.sas.com>), и SPSS (<https://www.ibm.com/analytics>) содержат множество статистических данных и методов анализа данных. R-популярная программная среда с открытым исходным кодом для статистических вычислений и графики (<https://www.r-project.org/>). Python-это полностью функциональный, открытый, интерпретируемый язык программирования. Различные пакеты могут быть легко установлены в Python, что делает его практичным в качестве статистического программного обеспечения.

## **2.8 Обработка помех в системах автоматизации**

Все инфраструктурные системы подвержены внешним возмущениям. Водопроводная компания не может контролировать поведение клиентов. Качество воды при добыче воды может измениться. Многие возмущения считались неуправляемыми. Однако это уже не так, и многие помехи могут быть по крайней мере ослаблены дизайном или автоматизацией и контролем. С точки зрения автоматизации рассматриваются два аспекта внешних возмущений:

- *Раннее предупреждение:* Измерение возмущения с точки зрения расхода и концентрации. Автоматический анализ и оценка сигналов могут обеспечить раннее предупреждение и могут передавать эту информацию для управления процессами ниже по потоку.

- *Управление:* Некоторыми возмущениями можно манипулировать и, по крайней мере, частично ослаблять, чтобы процессы ниже по потоку были менее возмущены.

Как мы готовимся к возмущениям, используя гибкий дизайн? Как мы проектируем по модульному принципу – чтобы адаптироваться к растущим требованиям будущего – и при этом иметь в виду контроль и автоматизацию? Необходимо учитывать способность справляться с помехами, и нельзя пренебрегать отношением между конструкцией установки и ее эксплуатацией. Конструкция не может быть основана только на стационарных соображениях. Необходимо учитывать динамическое поведение (рисунок 21). К сожалению, между инженерами-контролерами и инженерами-конструкторами до сих пор отсутствует взаимопонимание.

Автоматизация становится особенно важной в масштабах времени, которые слишком медленны или слишком быстры по сравнению с масштабами времени, с которыми люди могут справиться более легко. Некоторые нарушения и изменения происходят постепенно и развиваются в течение длительного времени.

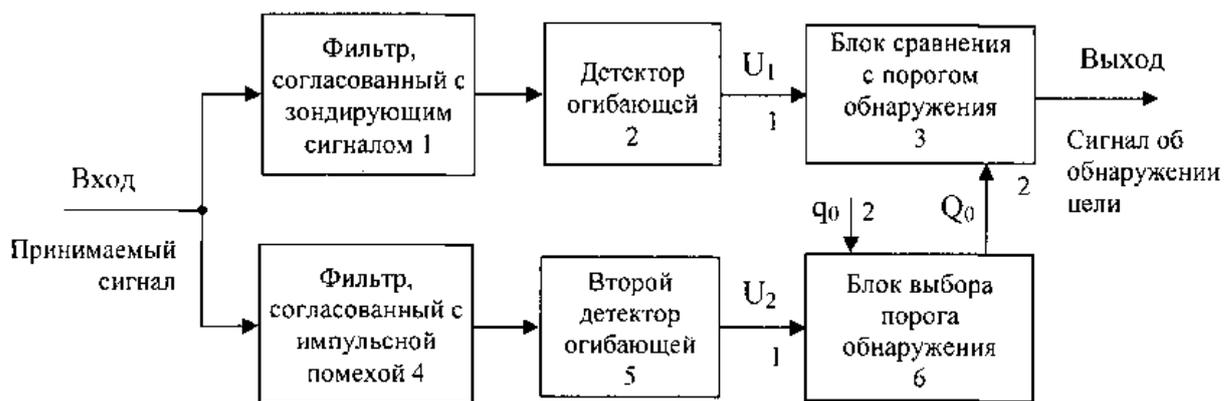


Рисунок 21 – Обнаружение системных аномалий

Они могут расти незаметно для человеческого наблюдателя, пока внезапно не достигнут критического уровня. Примеры включают медленные изменения состава вредных компонентов в источнике питьевой воды и управление активами, где износ может развиваться незаметно в течение длительного времени. Автоматизация должна применяться для непрерывного контроля износа стенок труб, слишком большого трения в клапанах, износа машин и т. Д. Непрерывный автоматический контроль медленного развития повышает шансы раннего обнаружения.

Внезапные возмущения могут быть слишком быстрыми, чтобы их мог легко обнаружить человек-оператор, как взрыв в водопроводной трубе. Автоматизация помогает людям последовательно искать небольшие изменения.

## 2.8 Автоматизация систем водоподготовки

Централизованная система водоснабжения – это сложная инфраструктура, требующая больших инвестиций, поэтому есть очевидные стимулы для оптимизации работы. Это включает в себя экономию энергии, раннее обнаружение изменений качества сырой воды, обнаружение и локализацию утечек и всплесков, а также удовлетворение потребностей

пользователей. Растущая нехватка воды является еще одной очевидной движущей силой.

Одним из важнейших атрибутов, на которые обращают внимание инженеры, работающие в сфере водоснабжения, при определении оборудования, является длительный расчетный срок службы. Поэтому очень важна прочная конструкция и надежные компоненты. Кроме того, водным инженерам необходимо, чтобы оборудование было стандартизированным во всей области водного хозяйства, потому что они могут перевести на другую работу через пять, десять или даже пятнадцать лет.

Насосы с инверторным управлением можно использовать для согласования спроса и предложения по всей распределительной сети, обеспечивая больше воды в пиковые часы и сокращая ее обратно, скажем, ночью, когда спрос падает. Подобное снижение давления в распределительной сети оказывает значительное влияние на потери из-за утечки (рисунок 22). Точно так же такими процессами, как аэрация, химическая подача и очистка сточных вод, можно более точно управлять с помощью инверторов на различных насосах и двигателях.



Рисунок 22 – Насосы с инверторным управлением

В течение многих лет водная промышленность использовала клапаны для уменьшения расхода в периоды низкого спроса. Но это означало, что двигатели насоса продолжали работать на полной скорости, что потребляло много энергии. Примечательно также, что двигатели часто были слишком большими для своей основной работы, так что у них было немного дополнительной мощности в резерве, но это означало, что они постоянно потребляли больше энергии. Современная альтернатива заключается в добавлении инверторного управления к двигателям, что позволяет снизить скорость насоса в периоды низкого спроса для экономии энергии.

Важным преимуществом инверторов является то, что при работе оборудования менее чем на полной скорости происходит последовательное снижение износа в дополнение к экономии энергии. Это может привести к снижению требований к техническому обслуживанию и техническому обслуживанию, что в случае удаленных и труднодоступных насосных станций может представлять собой значительную экономию затрат только в логистике.

Кроме того, идеальный инвертор водной промышленности должен иметь возможность выполнять автоматические самодиагностические проверки и передавать результаты по беспроводной связи обратно в технический отдел, чтобы инженерам не приходилось выезжать на место для рутинной работы.

Электронный интеллект инвертора также может быть использован для решения специфических для водной отрасли задач, таких как управление гидроударами и системами разблокировки.

Водная промышленность требует, чтобы инверторы могли плавно запускать насосы и другое оборудование, распознавать повторяющиеся колебания давления гидроудара и сглаживать их. Это не только снижает требования к техническому обслуживанию и ремонту, но и может продлить срок службы двигателя за счет снижения напряжений в электрической системе.

В качестве примера достаточно сложной системы управления в водном хозяйстве рассмотрим подготовку питьевой воды (рисунок 23).

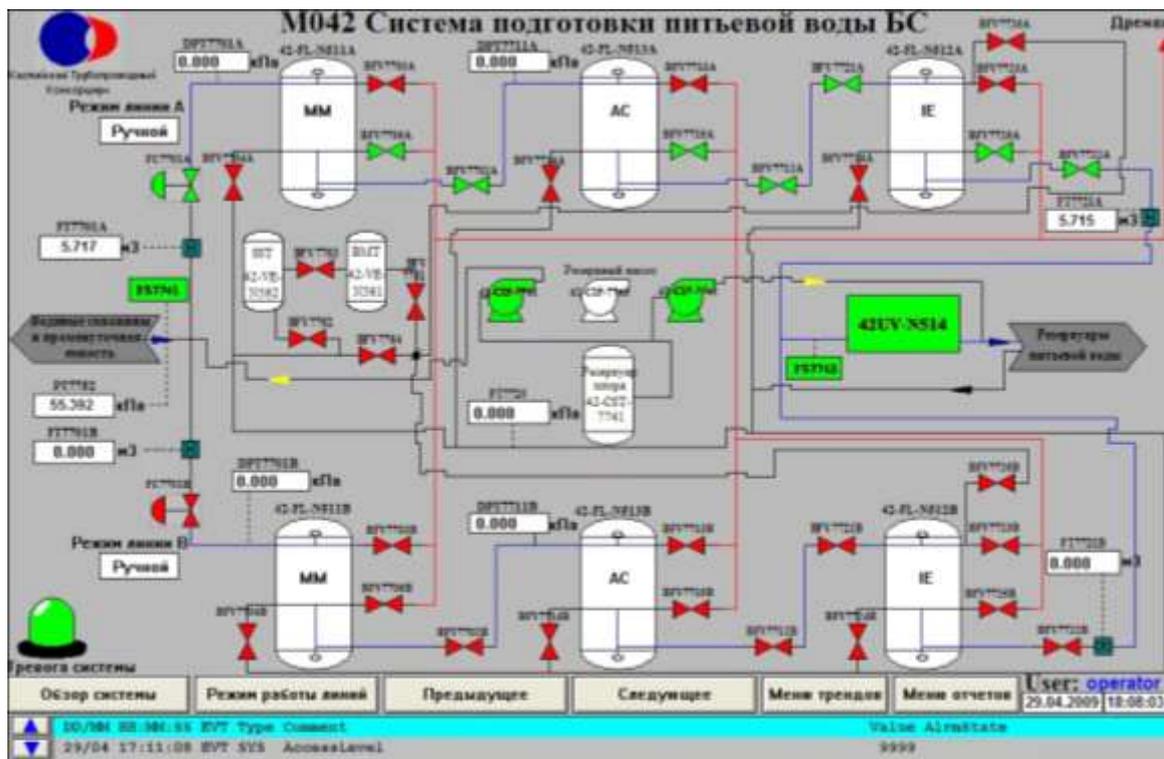


Рисунок 23 – Мнемосхема подготовки питьевой воды

Очистка питьевой воды в значительной степени зависит от коагуляции с последующим разделением. Глобальные затраты на коагулянты огромны, что мотивирует контроль дозирования коагулянта. Как правило, система контроля дозировки измеряет мутность, pH, проводимость и температуру питательной воды. Моделируя, как переменные связаны с количеством дозировки, можно разработать прямой контроль. Путем измерения ключевых переменных, таких как pH, мутность, размер хлопьев и форма воды, дозированной коагулянтом, создается структура обратной связи, которая демонстрирует важность того, чтобы прямая связь всегда сочеталась с обратной связью [29].

Использование мягких датчиков становится все более важным при оценке качества воды. Мягкие датчики-это компьютерные модели, которые вычисляют оценки качества воды, рассчитанные на основе физических измерений, таких как давление, расход и положение клапана, окислительно-восстановительные процессы и проводимость, а также точные модели.

Ключевой особенностью управления является распознавание динамических изменений, а не базирование операции на стационарных соображениях. Традиционно потребительское потребление отражается на уровне воды, а производство регулируется по уровням. Однако, прогнозируя потребление воды в течение следующих 24 или 48 часов, производительность насосные станции может быть скорректирована таким образом, чтобы вариабельность была сведена к минимуму. Это, в свою очередь, улучшит как качество воды, так и энергоэффективность.

## **2.9 Контроль давления в системах распределения воды**

Насосы являются важнейшими частями распределительной системы водоснабжения. Управление насосом и его оптимизация изучаются в течение многих лет. Рассмотрим районную измерительную зону, где один насос обеспечит расход и необходимое давление. Давление вдоль распределительных труб изменяется с высотой и с расходом по трубе. Давление должно быть достаточно высоким для любого клиента, и самый удаленный клиент обычно представляет собой критическую точку давления. Когда потребление будет высоким, давление будет падать быстрее вдоль трубы. Для достижения критической точки давление на головном конце должно быть достаточно высоким. Следовательно, давление обычно выше, чем необходимо для клиентов, находящихся далеко от критической точки. Традиционно редуцирующие клапаны изменяют давление. При низком потреблении в ночное время снижение давления вдоль трубы значительно меньше, поэтому критическое давление будет увеличиваться. Таким образом, давление в критической точке может существенно изменяться в течение суточного периода [30].

Существует несколько недостатков традиционного контроля давления. Во-первых, избыточное давление стоит энергии. Во-вторых, большие перепады давления вызывают механический износ труб, повышая вероятность

протечек и разрывов. В-третьих, как только произошла утечка, более высокое давление приведет к потере большего количества воды. Это мотивирует точный контроль давления (рисунок 24).



Рисунок 24 – Контроль давления в системах распределения воды

Усовершенствованный контроль давления должен гарантировать, что критическое давление поддерживается круглосуточно. Это часто контролируется с помощью редукционных клапанов вдоль трубы, но каждый клапан вызывает потерю энергии. Вместо этого давление должно регулироваться устройствами повышения давления вдоль трубы. Управление переменной скоростью для насосов и компрессоров должно быть стандартным выбором оборудования для лучшей управляемости и для более высокой

энергоэффективности. Существуют коммерчески доступные системы управления для такого рода управления давлением. Таким образом, давление можно поддерживать чуть выше минимального требования, экономя энергию, снижая риски утечки. Накачка должна основываться на измерении и контроле в реальном времени. Для достижения более совершенного контроля давления статистика суточных колебаний может служить базовой линией для контрольных расчетов.

Усовершенствованный контроль системы распределения воды приведет к большой экономии, как показали Ganidi & Holden [32]. Одна из проблем заключается в применении соответствующего горизонта прогнозирования для контроля. Ganidi & Holden обнаружили, что 3-часовой период прогнозирования дает лучшую производительность, чем 12-часовой горизонт. Это требует, чтобы обработка данных была достаточно быстрой.

## 2.10 Обнаружение утечек

Традиционно обнаружение утечек основывалось либо на данных вне распределительной сети, либо на данных от датчиков, введенных в сеть в определенное время. Разработка заключается в создании постоянного набора датчиков в распределительной сети. Дополнительные датчики давления и расхода могут быть развернуты в водораспределительных сетях и объединены с интеллектуальным измерением воды в месте нахождения пользователя. Было разработано большое количество методик и методов не только для обнаружения внезапной утечки (разрыва) или медленной утечки, но и для определения места утечки, как в однотрубной системе, так и в распределительной сети. Обзор современных технологий обнаружения взрывов и управления утечками содержится в работах *Puust et al.* [32], *Romano et al.* [34] (рисунок 25). Как описано выше, вероятность утечек будет уменьшаться при соответствующем регулировании давления.

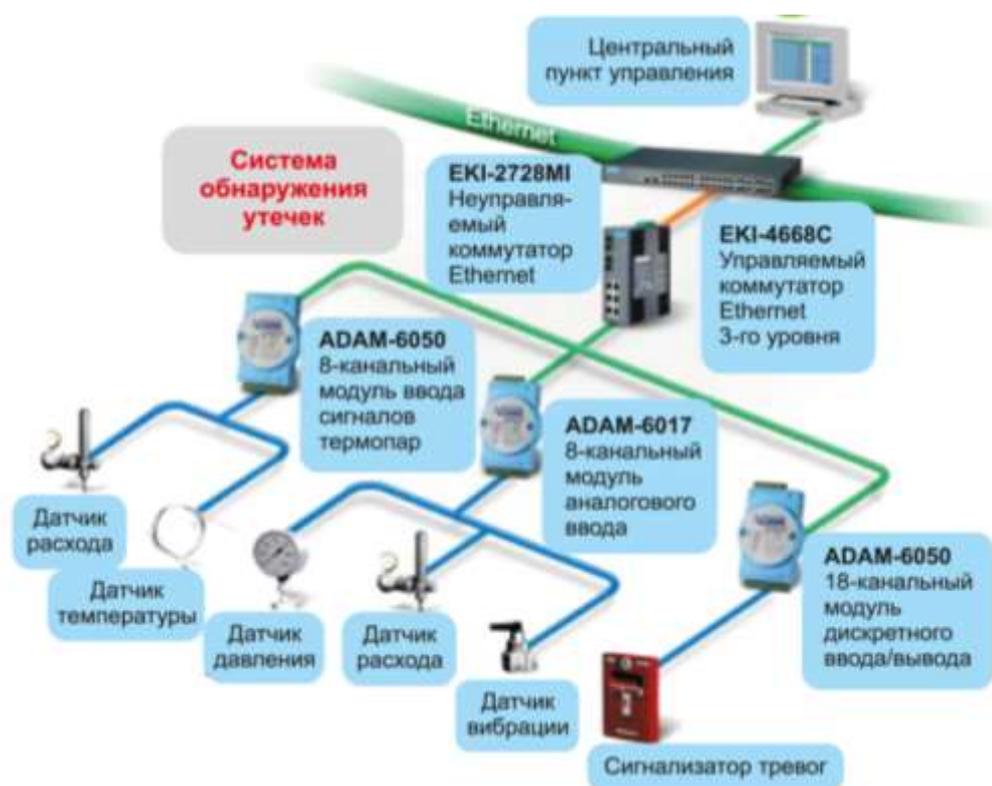


Рисунок 25 – Система обнаружения утечек воды

## 2.11 Стимулирующие факторы для экономии энергии

Затраты электроэнергии на водоснабжение, в которых преобладает энергия перекачки, составляют около 80% затрат на очистку и распределение воды. Однако большая часть затрат на электроэнергию связана с использованием потребителем, где большая часть энергии расходуется на нагрев воды. Статистика, а также основные энергетические балансы показывают, что более 90% связанной с водой энергии в городском водном цикле используется дома (Reffold *et al.* 2008; Kenway *et al.* 2011; Olsson 2015; Kenway *et al.* 2019 [33]). Для нагрева воды потребуется около 30-50 кВтч/м<sup>3</sup> что на 1-2 порядка больше, чем энергия для доставки (холодной) питьевой воды и очистки сточных вод. Какой бы источник энергии ни использовался для нагрева воды – природный газ, сжигание твердых отходов или электричество, – существуют очевидные стимулы для экономии энергии потребителей. Растет интерес к рекуперации тепла из отработанной воды, с

помощью тепловых насосов там, где есть необходимость в отоплении, или путем рекуперации тепла из бытового потребления в душевых кабинах, стиральных машинах и т. д. Потребление энергии мотивирует усилия по влиянию на потребителей и их потребление воды. На рисунке 26 показаны динамика снижения объемов потребления энергоресурсов в системах водоснабжения и водоотведения в городе Санкт-Петербург за последние 5 лет.

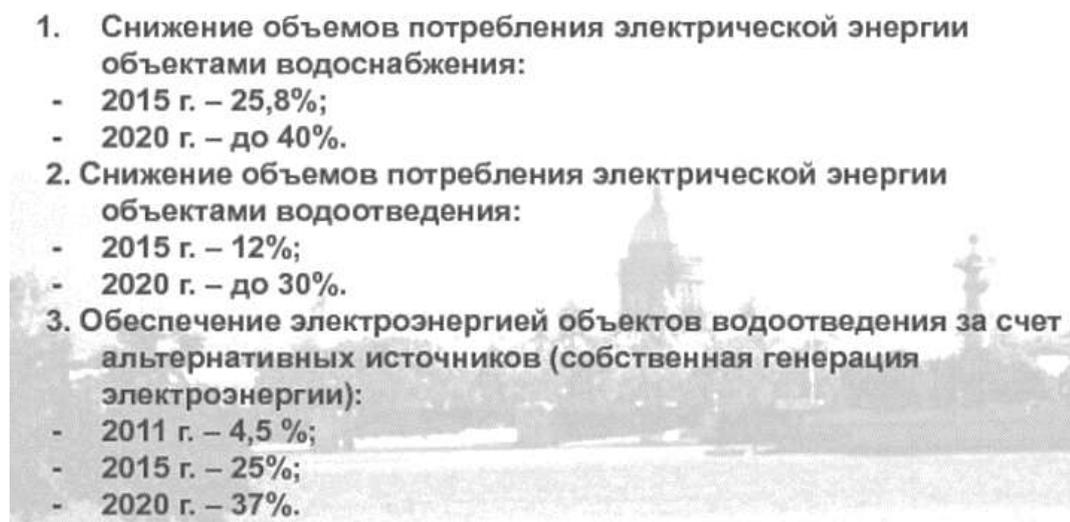


Рисунок 26 – Динамика снижения объемов потребления энергоресурсов

В течение долгого времени коммунальные службы поощряли или субсидировали водосберегающее оборудование, такое как душевые головки, смесители, унитазы, стиральные и посудомоечные машины. Интеллектуальные счетчики воды, подключенные к беспроводной сети, позволят снизить потребление воды в различных местах на 2,5-29%. Стимулы к использованию приборов учета будут возрастать вместе с дефицитом воды. Коммунальные компании имеют амбициозную программу установки интеллектуальных счетчиков и стремятся к тому, чтобы к 2030 году измерять 100% подключений по всему региону. В настоящее время около трети клиентов имеют установленные счетчики, и они используют в среднем на 12% меньше по сравнению с клиентами без индивидуального учета.

Есть способы, чтобы косвенно контролировать расход воды, в режиме реального времени информации, и структуры тарифов. Автоматическое

измерение воды может быть дополнено информацией в реальном времени для клиента. Ваше потребление воды на прошлой неделе было на 20% выше среднего и подобные сообщения. Нельзя недооценивать структуру тарифов. Если фиксированная стоимость составляет большую часть общей стоимости, это не дает стимула экономить воду. Массовые субсидии имеют место как в регионах с низким, так и в регионах с высоким уровнем доходов, что приводит к серьезной недооценке и серьезному злоупотреблению со стороны отдельных лиц и промышленности. Однако необходимо обеспечить, чтобы каждый человек имел право на получение чистой воды. Поэтому во многих местах и странах необходимо пересмотреть цены на воду. Чем ближе цена воды приближается к полной стоимости, тем лучше вода может быть оценена. Многие места заряжают воду так, что даже самые бедные люди могут позволить себе минимальное количество воды, самой ценной воды, от которой зависит жизнь. Все, что выше этого уровня, должно оцениваться в соответствии с реальными затратами, необходимыми для того, чтобы сделать воду пригодной для питья. Поливать газон в зоне с дефицитом воды не является правом человека и должно взиматься соответствующая плата. Проще говоря, мы должны платить меньше за необходимую потребность в воде и больше за потребности в "роскоши", как качественно показано на рисунке 27.



Рисунок 27 – Затраты водоканалы на энергетические ресурсы

## 2.12 Интегрированные системы

В будущих городских районах потребуется комплексное управление всем городским водным циклом. Водоснабжение будет осуществляться из нескольких источников: поверхностных вод, воды повторного использования, ливневых вод, подземных вод и морской воды как через централизованные, так и децентрализованные службы. Производство пригодной для использования воды станет более важным, поскольку различные виды водопользования не обязательно требуют одинакового качества воды. Эти стратегии добавляют еще один уровень сложности и без того сложной городской системе водоснабжения. Все системы и компоненты городского водного цикла – от источника воды до приемной воды – являются взаимосвязанными частями водной системы.

Важное следствие автоматизации было продемонстрировано много раз в проектах промышленной автоматизации. Установка в режиме реального времени управления силами и побуждает людей из различных секторов промышленности или коммунальных услуг обмениваться опытом работы с различными уровнями информации. Такая возможность предоставляется и в городских системах водоснабжения. Информация должна быть универсально доступной для эксплуатации, от водозабора до стока в приемную воду. Обработка помех – одна из очевидных причин. Другими причинами являются оптимизация энергопотребления и восстановление ресурсов.

Интегрированное управление несколькими подсистемами по-прежнему встречается редко, за исключением комбинированного управления переполнением канализации в интересах получения качества воды. Чтобы справиться с растущей сложностью городских водных систем, необходимо расширить перспективу от отдельных процессов до общезаводских и далее до всего городского водного цикла. Эта структура во многом вдохновлена моделью OSI (Open System Interconnection), которая применяется в промышленных системах связи. Такой переход требует системного

мышления, в котором рассматривается множество взаимосвязей между процессами и отдельными регуляторами.

### **2.13 Децентрализованные системы подачи и распределения воды**

Децентрализованный подход к водоснабжению, такой как откачка грунтовых вод, децентрализованный сбор ливневых вод и местная очистка и повторное использование сточных вод, извлекает выгоду из преимуществ разделения источников, что поощряет простые мелкомасштабные системы и повторное использование на месте. Аргументы в пользу децентрализованных систем управления сточными водами для общин в сельских или пригородных районах обсуждались и отстаивались многими. Объекты децентрализации обычно могут быть построены для точного удовлетворения текущих потребностей и расширены позже, по мере возникновения новых потребностей.

Даже в развитых странах города постепенно утрачивают свой характер густонаселенных поселений и постепенно вытягиваются в сельскую местность. Поскольку затраты на системы распределения или сбора в основном являются доминирующими капитальными затратами, децентрализация становится жизнеспособной альтернативой. Технология как для очистки питьевой воды, так и для повторного использования воды является масштабируемой, начиная с размеров домашних хозяйств и выше. Кроме того, электроснабжение также масштабируется и является реальностью сегодня. Эти тенденции будут опираться на интеллектуальные решения, использующие адекватные датчики, управление и надежную, доступную и удобную для пользователя автоматизацию.

Возможно, изменится и вся бизнес – модель децентрализованной очистки воды. Пользователь не может владеть оборудованием, и ответственность за его эксплуатацию и качество продукции возлагается на бизнес-оператора. Мы будем покупать воду по количеству и качеству.

Интегрированное городское управление водными ресурсами может выйти за рамки водных ресурсов. Связь воды и энергии была четко определена (Olsson 2015) [31]. Существует также тенденция к гибридной структуре, включающей производство электроэнергии, производство воды и очистку сточных вод как в централизованном, так и в децентрализованном масштабе.

Развитие возобновляемых источников энергии, в первую очередь солнечной фотоэлектрической и ветроэнергетики, уже кардинально меняет доступность электроэнергии и способствует снижению углеродного следа. Доступная электрическая энергия является критическим фактором для перекачивания или очистки воды. Доступом к электрической энергии могут пользоваться 84% населения земного шара, а это означает, что почти 1,2 миллиарда человек все еще без него. Технологии возобновляемых источников энергии уже вносят значительный вклад в обеспечение всеобщего доступа к безуглеродной энергии. В настоящее время мир ежегодно добавляет больше возобновляемых источников энергии, чем добавляет (нетто) от всех видов ископаемого топлива вместе взятых (IRENA 2020) [32].

Во многих регионах мира, где существует энергетическая бедность, имеются в изобилии возобновляемые источники энергии. Солнечная и ветровая энергетика открывает огромные возможности в автономных системах электроснабжения. Малые несетевые системы имеют потенциал для улучшения доступа к энергии в сельских и пригородных районах развивающегося мира, обеспечивая не только освещение и отопление, но и откачку воды для получения доступа к воде, а также повторное использование и очистку воды с использованием различных технологий, включая биологическую очистку и обратный осмос. Уже солнечная энергия в небольших установках обеспечила электроэнергией и вывела миллионы людей из нищеты. Возобновляемые источники энергии открывают новые возможности благодаря своей масштабируемости. Он может поставлять энергию для всех видов водных операций, от уровня домохозяйства до уровня деревни или городского сообщества, от диапазона кВт до нескольких сотен

МВт. Возможности производства чистой воды с использованием возобновляемых источников энергии в сочетании с автоматизацией.

## 2.14 Перспективы развития систем автоматизации

Будущее автоматизации систем водного хозяйства во многом зависит от развития информационных технологий, вычислительной техники, измерительной аппаратуры, исполнительных устройств. Успехи в развитии промышленности и передовые научные разработки позволяют надеяться, на то, что в скором будущем процент автоматизации водного хозяйства значительно возрастет. В перспективе позволят перераспределить ресурсы на энергосбережение, повышение качества водоснабжение. Что особенностям важно в случае с дефицитом чистой питьевой воды, который всё больше и больше ощущается в последнее время во многих странах мира, в том числе и в нашей стране особенно в южных регионах, где стремительно растет население увеличиваются города, увеличивается площадь орошаемых земель и растет промышленное производство:

- *Холистические системы*: индустрия сточных вод в 2025 году станет просто частью "водной индустрии", отрасли, связанной со всеми аспектами ресурса, который мы называем "водой". И все же мы будем рассматривать весь городской водный цикл как единую систему.

- *Полное возмещение затрат*: к 2025 году потребители воды будут платить столько, сколько это стоит. Никаких скрытых субсидий от наших налогов. Только тогда мы все будем ценить воду так же, как те, кто борется за выживание в засушливых землях. Тарифы на воду во многих местах очень странные и не отражают реальной стоимости воды.

- *Нулевой сброс в сухую погоду*: в сухую погоду система водоснабжения будет почти "закрытой системой". То есть полная рециркуляция очищенных сточных вод, никаких явных сбросов в приемные воды и только

необходимость подпитки пресной водой для учета утечек в распределительной системе. Сырой погоды необработанного обхода не будет.

- *Обычно автоматизированные заводы:* команда качества будет посещать их, возможно, раз в неделю, возможно, когда приезжает команда технического обслуживания. Контроль и управление будут осуществляться автоматически с дистанционным регулированием. Возможно, ноутбук и модем, уже используемые на нескольких заводах, даже заменят домашним "интернет-телевидением".

- *Централизованные системы качества и группы систем:* наша команда качества теперь будет присматривать за 10 или, может быть, даже за 20 заводами. Группа систем, вероятно, будет еще более централизованной, вероятно, только одна для всей городской системы водоснабжения или даже ответственная за несколько полных систем. Рутинные операции автоматизированы.

Некоторые из этих мечтаний более чем двадцатилетней давности все еще нуждаются в реальности, автоматизация может быть инструментом для реализации некоторых из этих целей. Например:

- *Приборостроение:* будет целый ряд недорогих датчиков, и мы должны автоматически измерять и оценивать состояние всего городского водного цикла.

- *Связь:* такие системы, как IoT, соединят тысячи датчиков и "мягкую" информацию в городских системах водоснабжения. Следовательно, *кибербезопасность* будет представлять собой растущую угрозу, и водоканалам, а также другим критически важным инфраструктурным организациям потребуется создать устойчивость, связанную с кибербезопасностью. Нынешняя тенденция к удаленной рабочей силе и удаленным операциям еще больше усугубляет проблему кибер-риска.

- *Управление данными, согласование и анализ:* огромных объемов данных: мягкие датчики являются естественными частями системы. Однако стоит отметить, что многие инструменты уже доступны в течение

десятилетий, но с различными названиями, такими как моделирование черного ящика (например, идентификация процессов, модели ARMAX и искусственные нейронные сети), моделирование серого ящика (где требуются знания о процессах), а также машинное обучение. Вычислительная мощность не будет препятствием, а скорее наша способность интерпретировать и конденсировать данные в полезную информацию.

- *Автоматическое обнаружение*: должно быть рутинной задачей, и эффективные алгоритмы искусственного интеллекта должны помочь нам обеспечить раннее обнаружение и *диагностику* внешних событий, а также внутренних неисправностей оборудования. Поиск эффективных средств диагностики потребует значительных усилий. Более частые экстремальные погодные явления потребуют систем раннего предупреждения для обработки экстремальных условий. Это также означает комплексный взгляд на городскую систему, как со стороны водоснабжения, так и со стороны используемого сбора и очистки воды.

- *Возобновляемые источники энергии, в первую очередь солнечная и ветровая*, будут в гораздо большей степени использоваться для водных операций не только в районах за пределами энергосистемы, но и для децентрализованных водных операций в пригородных районах.

- *Новые процессы*: разработаны для обработки различных промышленных и фармацевтических микрополлютантов с использованием специализированной биомассы. Это открывает возможности для децентрализованных процессов очистки воды и восстановления ресурсов. Мы больше не будем требовать одного качества воды для всех, а качества воды, связанного с использованием воды. Мы будем применять гораздо больше повторного использования воды.

- *Устойчивость*: мы будем лучше справляться с устойчивостью с помощью наших систем в гармонии с природой. Я должен стремиться к метрике для оценки устойчивости различных вариантов, которая будет

способствовать плодотворному диалогу между участниками: политиками, экологами, инженерами и экономистами.

- *Интегрированное проектирование с учетом эксплуатации*: сегодня мы видим хорошие примеры, когда проектирование дополняется динамическим моделированием. Это должно быть обычной процедурой проектирования завода. Компромисс между избыточными объемами и большей властью над управляемыми переменными-это проблема, с которой необходимо столкнуться при проектировании. Мы заявили об этом 25 лет назад, и это все еще важный вопрос.

- *Образование*: все более сложная водная промышленность будет конкурировать с основными технологическими отраслями для инженеров-технологов и инженеров технологических систем.

Недостаточно сделать системы водоснабжения умными; мы должны быть умнее водопользователей. И все еще верно на 25 лет вперед: вода-это жизнь, и мы должны относиться к ней мудро. Вызов 1998 года, возможно, все еще остается в силе: "Наши общества будут нуждаться в чистой воде и чистом воздухе. Устойчивость будет не только вопросом затрат. На самом деле в некоторых странах это уже вопрос выживания. Какую роль будет играть автоматизация в этом развитии и как мы можем решить эту проблему.

## **2.14 Экологический аспект внедрение средств автоматизации**

Ценности, определяющие отношения между городским водопользованием и природой, являются ключом к развитию доверия: может ли природа доверять нам? В знак нового отношения к природе Боливия и Эквадор приняли законы, предоставляющие всем природным существам равные права с людьми [35]. В Эквадоре Конституция закрепляет право природы на полное уважение. На практике это означает, что все люди, общины, народы и нации могут требовать от эквадорских властей соблюдения прав природы. Одним из таких прав, согласно статье 72, является право на

восстановление. В Новой Зеландии племя маори успешно боролось за то, чтобы их река Вангануи – и предок – на Северном острове получили те же законные права, что и человек. Река Ганг в Индии недавно получила права человека. [34]

Автоматические измерения и системы раннего предупреждения являются важными инструментами для создания устойчивой связи между городской водной системой и природой. Мы должны стремиться к измерению качества водозабора в режиме реального времени, включая индикаторные организмы, а также онлайн - измерения экологического состояния местной среды.

В ходе (цифровых) дискуссий на Стокгольмской Всемирной неделе водных ресурсов в 2020 году было отмечено, что компании всех размеров сталкиваются с одной и той же проблемой – у них есть больше решений, чем они могут продать. Если бы регулирующие органы сделали выбор в пользу более экологичных решений, то возник бы бурно развивающийся рынок технологий умной воды, и волна новых инноваций [31]. Уже существует множество решений, которые принесут пользу людям и природе, но бизнес - обоснование для них еще не существует. Существует очевидный провал, когда лица, принимающие решения, не знают, как оценить ценность природы. Мы, специалисты в области водных ресурсов, должны лучше понимать роль воды для человека и природы в терминах, которые могут перевести эту перспективу в экономические расчеты [29].

### **Вывод по главе 2:**

Установлено что наиболее перспективное направление развития системы автоматизации в сфере водоснабжения является применение комплексных решений, направленных на поддержание оптимального уровня энергопотребления, улучшение качества водоснабжения. Данные мероприятия возможно реализовать, используя современные достижения в области измерительной техники, информационных технологий, и систем

комплексного управления Центральная система диспетчеризации. При проектировании систем автоматизированного управления в сфере водоснабжения необходимо учитывать опыт отечественных производителей и наработки зарубежных поставщиков оборудования, а также проводить научно-исследовательские работы, направленные на увеличение надежности, долговечности систем автоматизации.

## Глава 3 Практическое применение теоретических и экспериментальных результатов

### 3.1 Расчёт энергопотребления насосными установками

Для современных насосных агрегатов в зависимости от их мощности, назначения и других факторов значение КПД варьируется в пределах от 0,3 до 0,9. Мощность, кВт, потребляемая насосом, определяется по формуле:

$$N = 9,81 \frac{QH}{\eta_n} \quad (56)$$

где  $Q$  — подача насоса, м<sup>3</sup>/с;

$H$  — напор насоса, м;

$\eta_n$  — КПД насоса.

Мощность, кВт, потребляемая насосным агрегатом:

$$P = \frac{N}{\eta_{эд}\eta_{пр}} \quad (57)$$

где  $\eta_{эд}$  — КПД электродвигателя;

$\eta_{пр}$  — КПД преобразующего устройства.

Количество электроэнергии, потребляемой агрегатом за время  $t$ , ч, при работе с постоянной подачей и неизменным давлением определяется по формуле:

$$W = Pt \quad (58)$$

«Для определения количества электроэнергии, потребляемой насосом при работе в неравномерном режиме, разработаны методики, которые позволяют прогнозировать потребление электроэнергии.

На рисунке 28 представлен график совместной работы насоса и трубопровода, а также упорядоченная диаграмма (кривая распределения) подачи жидкости, соединяющая ординаты графиков подачи жидкости в

порядке возрастания или убывания. Она может быть аппроксимирована уравнением прямой линии:

$$Q = Q_6 \left( (1 - \lambda) \frac{t}{T} + \lambda \right) \quad (59)$$

где  $Q_6$  – наибольшая подача за расчетный период;

$Q_M$  – наименьшая подача за расчетный период;

$\lambda$  – относительная минимальная подача,  $\lambda = Q_M/Q_6$ ;

$T$  – длительность расчетного периода.

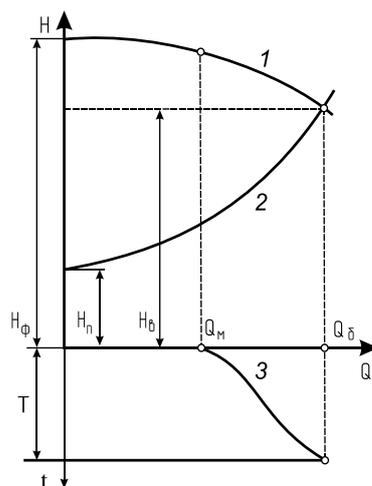
Из уравнений (58) и (59) получена зависимость потребляемой насосами мощности от времени, при условии, что насос работает без излишнего напора, т.е. рабочая точка насоса перемещается по характеристике трубопровода:

$$W = \frac{N_6 T (1 + \lambda)}{4\eta_{эд}} \left( (1 + H_n) + \lambda^2 (1 - H_n) \right) \quad (60)$$

где  $N_6$  – мощность, потребляемая насосом при наибольшей подаче, кВт;

$H_{II} = H_n/H_6$  – относительное противодавление» [17].

Мощность  $N_6$  вычисляется по формуле (56) при подстановке в нее значений наибольшей подачи  $Q_6$  и напора  $H_6$ , соответствующего этой подаче. Уравнение (60) позволяет вычислить потребление энергии насосной установкой за расчетный период времени  $T$ . Погрешность вычислений вставляет  $\pm(10-15)\%$  (рисунок 28).



1 – напорная характеристика насоса; 2 – характеристика трубопровода;  
3 – диаграмма подач

Рисунок 28 – График совместной работы насоса с трубопроводом и упорядоченная диаграмма подачи

### **Учет расхода электроэнергии:**

«Для прогнозирования потребления электроэнергии насосными станциями используются расчетные методы позволяющие, сравнить фактические затраты электроэнергии с ее научно обоснованным потреблением и выявить пути её экономии.

Фактические удельные расходы электроэнергии на подачу, кВт-ч/м<sup>3</sup>:

$$W_{y\partial} = W/Q, \quad (61)$$

где  $W$  – расход электроэнергии за расчетный период  $T_p$ , кВт-ч;

$Q$  – подача воды за время  $T_p$ , м<sup>3</sup>.

Расчетные периоды  $T_p$  должны быть достаточно длительны (для системы водоснабжения – неделя), поскольку за это время происходят наиболее характерные изменения в режиме работы насосных установок.

Зная фактический удельный расход электроэнергии, можно оценить целесообразность мероприятий по экономии электроэнергии. Для этого определяется удельный расход электроэнергии, вычисленный по результатам измерения до проведения мероприятий  $W_1$  и  $W_2$  после, фактическая экономия электроэнергии при  $Q_t$  – объем перекачки за год» [22].

$$W_{y\partial} = W_1 - W_2/Q_t. \quad (62)$$

### **3.2 Определение влияния внутренней коррозии труб на энергетические характеристики насоса**

Расчет и построение рабочих точек насоса Grundfos UPE 25-40 180 (рисунок 29) и опытного трубопровода выполнен в программе WinCAPS 7.43 (рисунок 30), результаты представлены на рисунках 31, 32, таблице 2.



Рисунок 29 – Насос Grundfos UPE 25-40 180



Рисунок 30 – Насосная станция Grundfos Hydro 2000 ME 3 CRE32-7

Максимальный КПД – 19,2% при расходе 1,6 – 1,8 м<sup>3</sup>/ч; максимальная мощность – 57 Вт при расходе 2,5 – 2,7 м<sup>3</sup>/ч. Рабочие точки построены в местах пересечения с линиями 1 (Q=1,4 м<sup>3</sup>/ч) и 3 (Q=1,2 м<sup>3</sup>/ч), полученных при наложении гидравлических характеристик сети на характеристики насоса. Результат представлен на рисунке 33.

Таблица 2 – Результаты расчёта и построение рабочих точек насоса UPE 25-40 180

Параметр	рисунок 31 (теоретическая)	рисунок 32 (опытная)
Расход $Q$ м <sup>3</sup> /ч	1,4	1,2
Напор $H$ , м	2,57	2,78
Мощность $P_1$ , Вт	55,6	54,9
КПД $\eta$ , %	17,6	16,6
Удельный расход электроэнергии $I$ , Вт·ч	39,7	45,75
Характеристика магистрали (сети) $S$ , ч <sup>2</sup> /м <sup>5</sup>	0,079	0,265

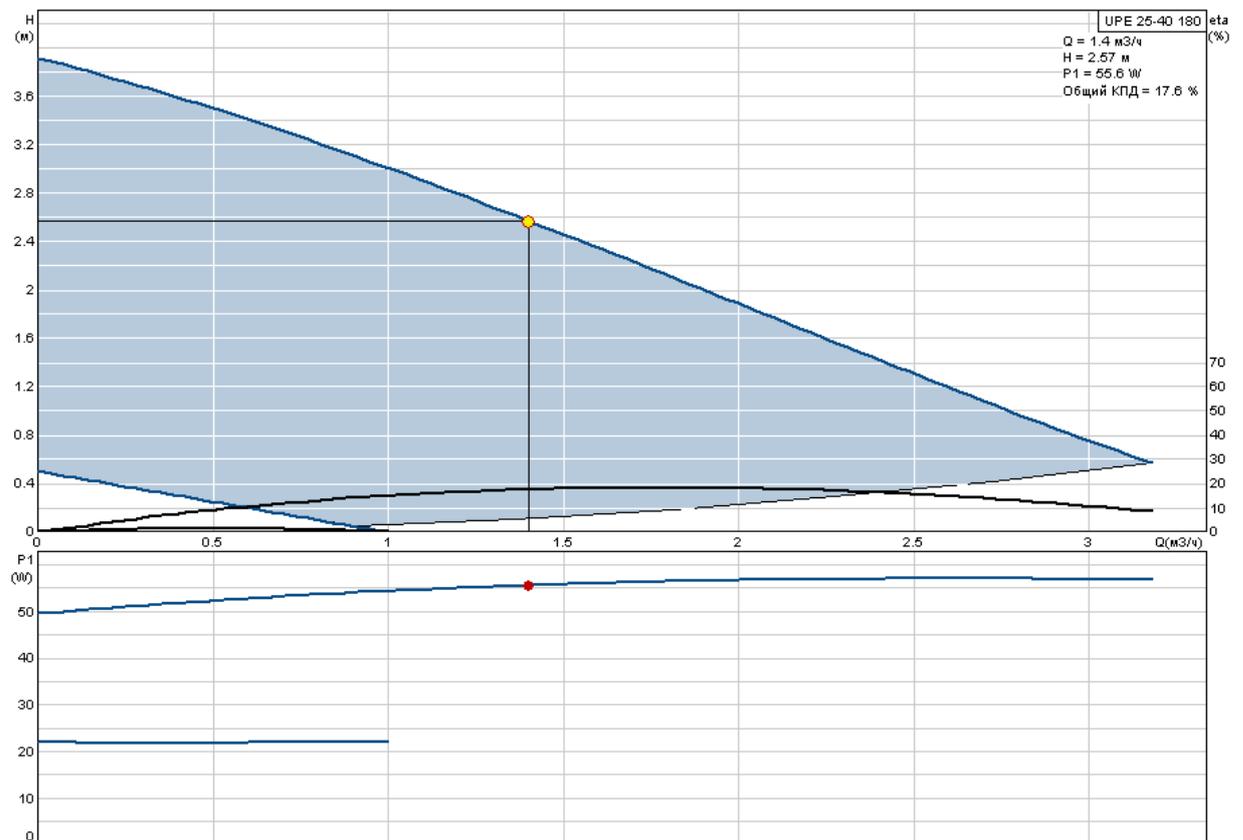


Рисунок 31 – Рабочая точка при Q=1,4 м³/ч (теоретическая)

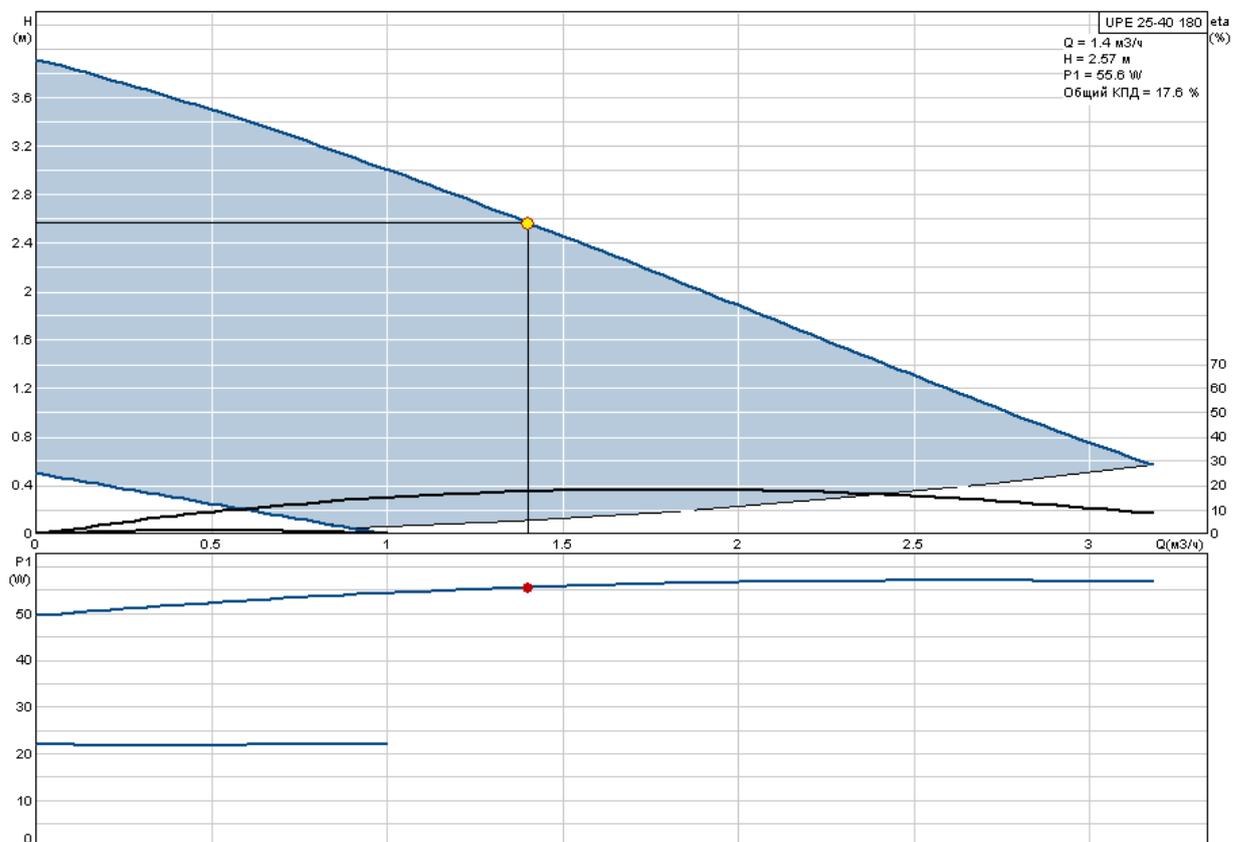


Рисунок 32 – Рабочая точка при Q=1,2 м³/ч (опытная)

«По графику совместной работы насоса и трубопровода (рисунок 3.19) видно, что насос на шероховатой трубе работает с большим напором (0,21 м) и меньшей подачей ( $- 0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) по сравнению с новой, гладкой трубой. При этом уменьшение мощности составляет 0,7 Вт, а КПД – 10%.

Работа насоса с пониженным КПД приводит к увеличению потребляемой мощности и затрат электроэнергии. В этом случае электродвигатель также используется не в номинальном режиме, т.е. с ухудшением КПД и коэффициента мощности ( $\cos\varphi$ )» [18].

### **Расчет мощности электродвигателя:**

«Выбранный электродвигатель не нуждается в проверке по нагреву или по перегрузке, так как завод-изготовитель произвел все расчеты и испытания, причем основанием для расчетов являлось максимальное использование материалов, заложенных в электродвигателе при его номинальной мощности. Номинальная мощность электродвигателя должна быть равна или больше расчетной с учётом  $k_3$  – коэффициента запаса, принимаемым 1,1–1,3.

Мощность (кВт) электродвигателя для насоса определяется по формуле:

$$P = k_3 \frac{\rho g H Q}{\eta} \quad (63)$$

Мощность, потребляемая электродвигателем из электросети  $P_1$ .

У электродвигателей, непосредственно присоединенных к валу насосов, (привод циркуляционных насосов), максимальное значение потребляемой мощности указывается на табличке с техническими данными, в других случаях определяется по:

$$P_1 = V \cdot I \cdot \cos\varphi \sqrt{3} \quad (64)$$

(3-фазные электродвигатели)

$$P_1 = V \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (65)$$

(1-фазные электродвигатели)

где  $V$  – напряжение (В);  $I$  – сила тока (А);  $\cos\varphi$  – коэффициент мощности

Мощность на валу электродвигателя  $P_2$ .

Если электродвигатель и насос являются отдельными узлами указывается максимальная мощность на валу электродвигателя.

Мощность, потребляемая насосом  $P_3$ . Текущую нагрузку электродвигателя можно определить по кривой мощности насоса (рисунки 31, 32). В случае непосредственного присоединения электродвигателя к валу насосов:  $P_3 = P_2$ .

Мощность насоса  $P_4$ . Значение мощности насоса определяется по формуле:

$$P_4 = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q. \quad (66)$$

Потребляемая мощность  $P_1$  больше на величину потерь, которые преобразуются в тепло» [21].

Отношение мощностей представляет собой КПД насоса:

$$\eta = P_4 / P_1 \quad (67)$$

Электродвигатели переменного тока с фазным ротором предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения (насосов, вентиляторов и др.)

Характеристики двигателя насос Grundfos UPE 25-40 180:

- Частота вращения –  $n = 2900$  об/мин.
- Номинальная мощность –  $P_1 = 57$  Вт.
- Напряжение ротора –  $E = 220$  В.
- Ток ротора –  $I_p = 0,2-0,3$  А.
- Номинальный КПД –  $\eta = 19$  %.
- Номинальное скольжение –  $s_n = 0,01$
- Номинальный  $\cos\varphi = 0,9$
- Номинальный режим работы – продолжительный (S1).

Расчёт момента в зависимости от скорости, кНм:

$$M = \frac{\rho g H Q}{3600 \eta \omega} \quad (68)$$

где  $\omega$  – скорость вращения вала двигателя,  $c^{-1}$ :

$$\omega = \frac{\pi n_n}{30},$$

$n_n$  – частота вращения с учётом номинального скольжения, об/мин:

$$n_n = n_c (1 - s_n)$$

Расход энергии насосного агрегата на подачу 1 м<sup>3</sup> воды (кВт · ч):

$$I = P_1 / Q. \quad (69)$$

Эту величину можно измерить, и она действительна для всей рабочей области.

Гидравлические параметры системы оказывают большое влияние на режим работы насоса. Совместная работа насосной установки и сети трубопроводов возможна, если подача насоса равна расходу в сети, а развиваемый насосами напор равен потерям напора в системе и статической высоте подъема жидкости. Несоответствие параметров насосной установки и системы трубопроводов, выбор насосов с «запасом» по напору и расходу без принятия специальных мер ведут к появлению режимов перегрузки, явлений кавитации, помпажа и др. При несоответствии расчетных и реальных параметров возникает режим работы, при котором или не обеспечивается требуемая подача или подача осуществляется с повышенным энергопотреблением.

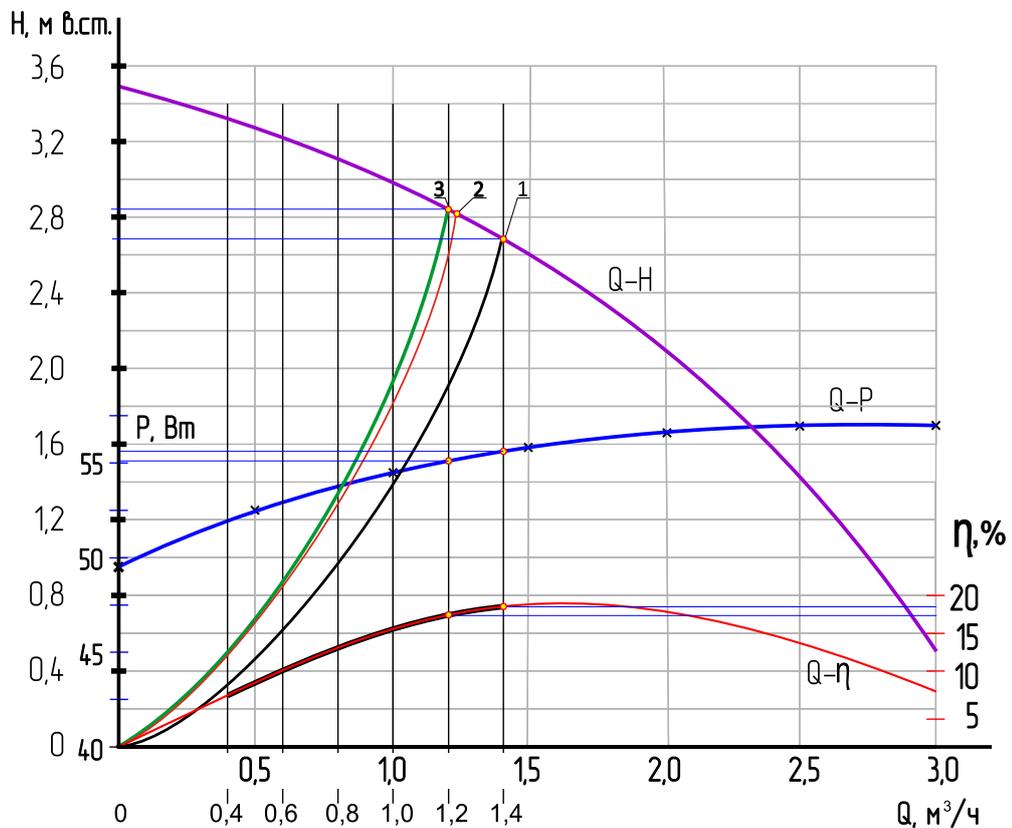


Рисунок 33 – Совместная работа насоса и сети

Проведённый анализ влияния состояния трубопроводов на гидравлическую характеристику водопроводной сети и режим работы насоса позволил обобщить теоретические сведения, данные полученные в результате экспериментов и разработать алгоритм расчёта затрат электроэнергии и определения её стоимости в зависимости от степени внутреннего зарастания и шероховатости стальной трубы.

Исходные данные для расчёта приведены в таблице 3. Результаты расчёта в таблице 4.

Таблица 3 – Исходные данные для расчёта

Параметр	Символ	Ед. изм.	Передано в формулу	Результат
1	2	3	4	5
Величины, задаваемые пользователем				
Длина трубы	$l$	м	(8)	$h_{mp}$
Диаметр трубы	$d$	м	(2–6,8)	
Абсолютная шероховатость	$\Delta_s$	м	(4,6)	$\lambda, e$
Статический напор	$H_{cm}$	м	(7)	s
Задаваемые, переменные величины				
Показания пьезометров	$h_1$	м	(1)	$h_n$
Показания пьезометров	$h_2$	м	(1)	$h_n$
Расход воды	$Q$	м <sup>3</sup> /ч	(2,7,8,10,11)	$V, s, h_{mp}, P$
Температура	$t$	°С		10
Стоимость 1 кВт·ч	$c$	руб.		2,23
Величины, взятые из справочной литературы (см. таблицу 5.3)				
Плотность жидкости	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	(3,10)	$Re, P$
Коэффициент кинематической вязкости	$\nu$	м <sup>2</sup> /с	(3)	$Re$
Коэффициент динамической вязкости	$\mu$	Па·с	(3)	$Re$
Ускорение свободного падения	$g$	м/с <sup>2</sup>	(4,10)	$\lambda, P$

Таблица 4 – Расчётные величины

Параметр	Символ	Ед. изм.	Передано в формулу	Результат
1	2	3	4	5
Площадь поперечного сечения трубы	$S_{mp}$	м <sup>2</sup>		
Потеря напора по длине	$h_{mp}$	м		
Средняя скорость течения	$V$	м/с	(3,8)	$Re, h_{mp}$
Коэффициент сопротивления трения	$\lambda$		(8)	$h_{mp}$
Толщина пограничного слоя	$S_{nc}$	м		

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5
Число Рейнольдса	$Re$		(4,5)	
Шероховатость	$e$			
Характеристика магистрали (сети)	$s$	$\text{ч}^2/\text{м}^5$		
Характеристика насоса	$H(Q)$			
Напор	$H$	м	(10)	$P$
Мощность	$P$	Вт	(12)	$I$
Удельное энергопотребление	$I$	Вт · Ч	(13)	$C$
Стоимость на 1 куб.м	$C$	руб	(14,15)	$\mathcal{E}, C_{\text{экс}}$
Затраты на преодоление доп.потеть	$\mathcal{E}$	руб		

По результатам измерений определяются следующие величины:

Разность показания пьезометров:

$$h_n = h_1 - h_2 \quad (70)$$

Средняя скорость потока в трубе:

$$V = 4Q/(\pi d^2); \quad (71)$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{\rho Vd}{\mu}, \quad (72)$$

Гидравлический коэффициент трения:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta_s}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (73)$$

Толщина пограничного слоя:

$$S_{nc} = 62,8d Re^{-0,875} \quad (74)$$

Шероховатость:

$$e = d/\Delta_s \quad (75)$$

Характеристика магистрали строится по точкам, при  $Q$  равном 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 м<sup>3</sup> /ч; и соответствующем напоре  $H$ , м. зависимость  $H(Q)$  для магистрали:

$$H(Q) = H_{cm} + SQ^2$$

Характеристика магистрали:

$$s = \frac{H - H_{cn}}{Q^2} \quad (76)$$

Потеря напора по длине:

$$h_{тр} = \lambda \frac{l V^2}{d 2g} \quad (77)$$

Зависимость  $H(Q)$  для насоса UPE 25-40 180

$$H = 3,5 - 0,056Q^{2.7} - \frac{Q^{1.96}}{Q+1.5} \quad (78)$$

Мощность (кВт) электродвигателя для насоса определяется по формуле:

$$P = k_3 \frac{\rho g H Q}{\eta} \quad (79)$$

Характеристика мощности для насоса UPE 25-40 180 строится по точкам, при  $Q$  равном 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 м<sup>3</sup>/ч:

$$P_I = 48 + 7(Q^{0.48} - 0,06Q^{1.7}) \quad (80)$$

Удельный расход энергии насосного агрегата на подачу 1 м<sup>3</sup> воды (кВт·ч):

$$I = P_I / Q \quad (81)$$

Стоимость перекачки 1 кубометра воды:

$$C = I \cdot c / 1000 \quad (82)$$

Таблица 5 – Параметры воды при разной температуре

$t$ , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\sigma \cdot 10^4$ , Н/м
0	999,9	1788	1,789	756,4
10	999,7	1306	1,306	741,6
20	998,2	1004	1,006	726,9
30	995,7	801,5	0,805	712,2
40	992,2	653,3	0,659	696,5
50	988,1	549,4	0,556	676,9

В зависимости от мощности двигателя  $P$ , кВт, и условий его работы следует принимаются коэффициенты запаса мощности  $k_3$ :

$P$ , кВт	$P < 1$	$1 < P < 5$	$5 < P < 50$	$50 < P < 100$	$P > 100$
$k_3$	1,5	1,5-1,25	1,25-1,15	1,15-1,05	1,05

По результатам расчётов, представленных в таблице 5 построены характеристики насоса UPE 25-40 180, характеристики сети для гладкой и

шероховатой труб (рисунок 34), характеристика мощности насоса (рисунок 35).

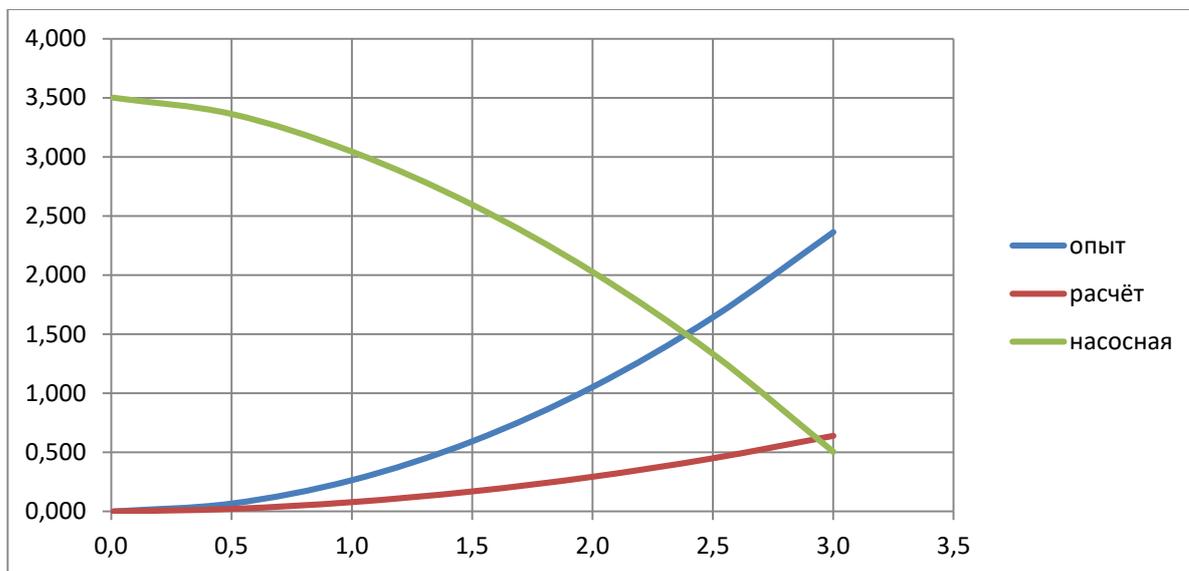


Рисунок 34 – Характеристики насоса UPE 25-40 180, характеристики сети для гладкой и шероховатой труб

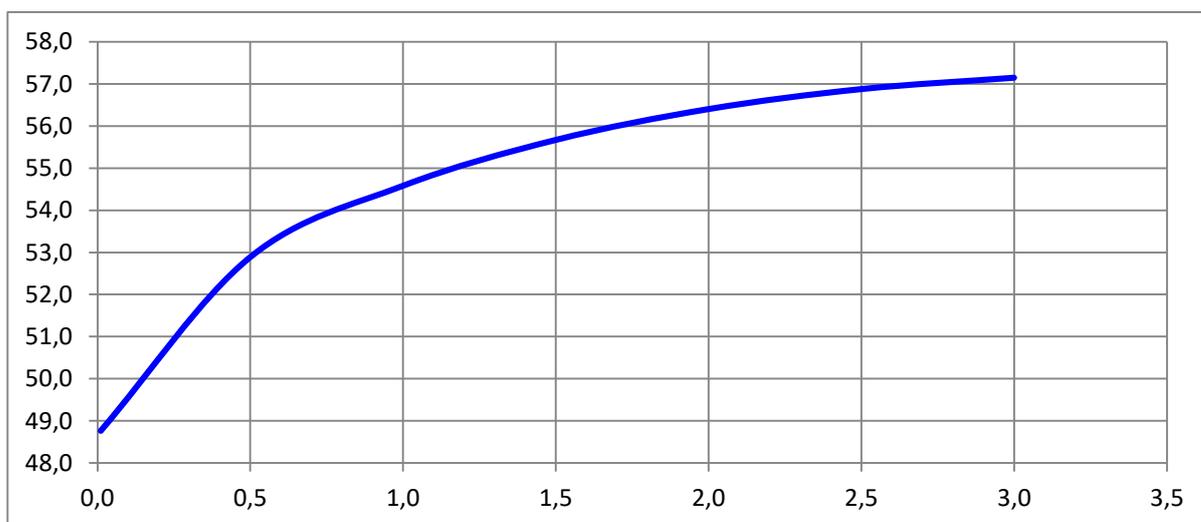


Рисунок 35 – Характеристика мощности насоса UPE 25-40 180

### 3.3 Оценка потенциала энергосбережения

Количество электроэнергии, вычисленное по (81), соответствует оптимальному режиму работы насосной установки, т.е. работе без превышения напоров, при максимальных значениях КПД и т.д. Реальные

режимы работы, как правило, отличаются от оптимальных. Основное отличие заключается в том, что напор, развиваемый насосными установками, превышает номинальные значения, соответственно реальное энергопотребление превышает расчётное.

Для оценки потенциала энергосбережения необходимо решить задачу: сколько нужно дать жидкости энергии, чтобы её хватило для достижения конечной цели (потребителя) и чтобы вся полученная энергия оптимально израсходовалась. Под оптимальным значением понимается величина, которая обеспечивает минимальное сочетание капитальных и эксплуатационных затрат.

Эксплуатационные затраты  $C$  – это оплата электроэнергии, которую потребляет электродвигатель насоса, передавая часть её перекачиваемой жидкости.

Капитальные затраты  $K$  – это затраты на приобретение трубопровода и насоса, на прокладку трассы.

Зная величину эксплуатационных затрат  $C_{экс}$  можно оценить эффективность энергосберегающих мероприятий и сроки их окупаемости, т.е. зная удельный расход электроэнергии насосного агрегата на подачу 1 м<sup>3</sup> воды  $I$ , (кВт·ч); массу (объём) перекачиваемой воды  $M$ , м<sup>3</sup>; Стоимость перекачки 1 кубометра воды  $C$ , руб. и время работы насоса  $t$ , час:

$$C_{экс} = I \cdot C \cdot M \cdot t, \quad (83)$$

Сравнивая значения эксплуатационных затрат  $C_H$  для новых и шероховатых  $C_{Ш}$  трубопроводов, вычисляется разница стоимости эксплуатации  $\mathcal{E}$ , дополнительные затраты на преодоление повышенного гидравлического сопротивления:

$$\mathcal{E} = C_{Ш} - C_H \quad (84)$$

В таблице 6 приведено экономическое сравнение годовых финансовых затрат на восполнение потерь при повышенном гидравлическом сопротивлении сети  $\mathcal{E}$  циркуляционного насоса UPS 80-120 F (рисунок 29) и

повысительной насосной станции Hydro 2000 ME 3 CRE32-7 (рисунок 30).  
 Нечётные строки – эксплуатация на новой трубе; чётные на шероховатой.

Таблица 6 – Результаты экономического сравнения

№	Наименование	$D_y$ мм	$H$ м	$P$ кВт	$Q$ м <sup>3</sup> /ч	$I$ кВт·ч	$C$ руб.	$\mathcal{E}$ руб.
1	UPE 80-120 F	80	6,5	1,52	45	0,0337	30 891	
2	UPE 80-120 F	80	8,12	1,44	35	0,0411	29 265	1 625
3	Hydro 2000 ME 3 CRE32-7	150	92	31,5	80	0,3938	640 180	
4	Hydro 2000 ME 3 CRE32-7	150	115	27,6	70	0,3943	537 868	102 312

### Выводы по главе 3:

1) Определены эмпирические зависимости  $H(Q)$  уравнение (9);  $P(Q)$  уравнение (11) для насоса UPE 25-40 180. Подтверждена таким образом правильность разработки алгоритма расчётов и необходимая точность результатов. Определены стоимость перекачки воды и финансовые потери при использовании шероховатых труб по сравнению с новыми.

2) Предложенная методика позволяет прогнозировать увеличение затрат на перспективу, рассчитывать целесообразность мероприятий по устранению описанной проблемы, определять сроки окупаемости замены трубопровода.

## Заключение

В процессе работы были выявлены наиболее существенные аспекты применения насосного оборудования и связанного с ними проблемами контроля и управления. Рассмотрены наиболее существенные пути повышения энергетической эффективности насосного оборудования, определены условия, при которых возникают дополнительные затраты электроэнергии на перекачивание воды, что может повести за собой не только экономические, но и также технические проблемы, связанные с выходом из строя насосов, создание аварийных ситуаций, перебои с водоснабжением населенных мест и промышленных предприятий. Для обеспечения необходимой степени автоматизации рассмотрены предпосылки, условия и технические средства, позволяющие обеспечить на современном уровне надежное управление системами водоснабжения. Разработан комплекс организационно-технических мероприятий, которые направлены на повышение надежности, увеличение срока службы, снижения эксплуатационных затрат энергопотребляющего оборудования.

Проведено технико-экономическое обоснование внедрения энергосберегающих мероприятий на примере насосных станций для индивидуального жилого дома, а также насосной станции, предназначенной для повышения давления холодной воды в многоэтажном жилом доме. В результате установлено, что одним из самых эффективных средств экономии энергоресурсов, в частности электроэнергии, является поддержание в удовлетворительном состоянии систем водоснабжения, арматуры, насосного хозяйства, электрических сетей, а также всей инфраструктуры водопроводных сетей населенных мест и промышленных предприятий.

## Список используемых источников

1. Автоматизация систем городского водоснабжения и водоотведения. М., 2007. - 137 с.
2. Афанасьев В.Н., Постников А.И. Информационные технологии в управлении предприятием. - М.: Моск. гос. ин-т электроники и математики, 2003.
3. Бойко В.В., Савинков В.М. «Проектирование информационной базы автоматизированной системы на основе СУБД» М.: Финансы и статистика, 1982.
4. Великанов Н. Л., Корягин С. И. Энергоэффективность городских сетей водоснабжения и водоотведения // ТТПС. 2014. №4 (30). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/energoeffektivnost-gorodskih-setey-vodosnabzheniya-i-vodootvedeniya> (дата обращения: 30.06.2021).
5. Годин В. В. И др. Информационное обеспечение управленческой деятельности. Издательства: Высшая школа, Мастерство. 2001. - 240 с.
6. Голицына О.Л., Максимов Н.В. - Базы данных. - М.: Форум - Инфра М, 2003. - 352 с.
7. Граничин О.Н., Кияев В.И. Информационные технологии в управлении. 2008 г., 336 с.
8. Грунтович Н.В., Капанский А.А. Расчетно-аналитический метод нормирования расходов электрической энергии в технологических системах водоснабжения и водоотведения // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2015. №2 (61). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschetno-analiticheskiy-metod-normirovaniya-rashodov-elektricheskoy-energii-v-tehnologicheskikh-sistemah-vodosnabzheniya-i> (дата обращения: 30.06.2021).
9. Дмитриев В.Д., Мишуков Б.Г. Эксплуатация систем водоснабжения, канализации и газоснабжения. М., 2007. - С.17.

10. Доронина Л.А., Черников Б.В. Новые информационные технологии хранения документов организации: К постановке проблемы // Делопроизводство. 2002. - № 1. - с. 33--39.

11. Здор Г.Н., Сеницын А.В., Аврутин О.А. Автоматическое управление группой насосных агрегатов с целью снижения затрат электроэнергии // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2017. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomaticheskoe-upravlenie-gruppoou-nasosnyh-agregatov-s-tselyu-snizheniya-zatrat-elektroenergii> (дата обращения: 30.06.2021).

12. Информационные технологии управления: Учебное пособие для вузов / Под ред. Титоренко Г.А. - М.: ЮНИТИ, 2003.

13. Карабутов Н.Н. Информационные технологии в экономике. Издательство: Экономика. 2003. - 208 с.

14. Кастальский А.К., Минц Д.М. Подготовка воды для питьевого и промышленного водоснабжения. М.: Высшая школа, 2002. - 354 с.

15. Козырев А.А. Информационные технологии в экономике и управлении. - СПб.: Изд-во Михайлова, 2000.

16. Конноли Т., Бегг К., Страчан А. Базы данных: проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика, 2-е изд.: Пер. с англ. // М.: Издательский дом "Вильямс", 2000.

17. Лезнов Б. С. Оценка эффективности регулируемого электропривода в насосных установках водоснабжения и водоотведения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. №3-4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-reguliruemogo-elektroprivoda-v-nasosnyh-ustanovkakh-vodosnabzheniya-i-vodootvedeniya> (дата обращения: 30.06.2021).

18. Маклаков С.В. BPWin, ERWin. CASE - средства разработки информационных систем. - М.: Диалог-МИФИ, 1999.

19. Мандрыкин А.В., Непышневский А.В. Информационные технологии в экономике: Учеб. пособие / Воронеж: Изд-во ВГТУ - Воронеж, 2003.

20. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. - Москва, 2009 г.

21. Методические указания по подготовке ВКР для специальности «Прикладная информатика в экономике». / И.А. Меркулина, Е.Н. Каширская, Л.Б. Никандров, А.П. Никитин. М.: ВГНА, 2007. - 78 с.

22. Муравьев Александр Викторович, Калинин Алексей Германович, Мясникова Татьяна Вячеславовна Управление энергосберегающими режимами насосных установок по критерию "баланс мощности" // Вестник ЧГУ. 2019. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-energoberegayuschimi-rezhimami-nasosnyh-ustanovok-po-kriteriyu-balans-moschnosti> (дата обращения: 30.06.2021).

23. Николаенкова И. В. Водоснабжение и водоотведение: поиск путей преобразования// Предпринимательское право в рыночной экономике. 2004. № 17.

24. Палкин Г. А., Горбунов Р. В. Способы повышения экономической эффективности и надежности эксплуатации участков первого подъема систем водоснабжения с накапливающим резервуаром // МНИЖ. 2015. №2-1 (33). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-povysheniya-ekonomicheskoy-effektivnosti-i-nadezhnosti-ekspluatatsii-uchastkov-pervogo-podema-sistem-vodosnabzheniya-s> (дата обращения: 10.06.2021).

25. Сотников Дмитрий Владимирович Повышение энергетической эффективности насосных станций // Вестник российских университетов. Математика. 2013. №5-3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-energeticheskoy-effektivnosti-nasosnyh-stantsiy> (дата обращения: 30.06.2021).

26. Техничко-экономическое обоснование дипломных проектов. Под редакцией Беклешова В.К., Москва, «Высшая школа», 2009 г.

27. Шураков В. В. «Автоматизированное рабочее место для статической обработки данных», 2000.

28. Beyeler C. (2011) : «Alimentation en eau potable et élimination des déchets des systèmes en crise, analyse comparative Etats-Unis – Etats-Unis sur la période 1960-1990 », thèse de doctorat de l'université Paris XII, Etats-Unis.

29. Fowler H.J., et Kilsby, C.G. (2007). Using regional climate model data to simulate historical and future river flows in northwest England. *Clim. Change*, 80:337–367, DOI 10.1007/s10584-006-9117-3.

30. Kettab, A. (2002) : « Water resources : realites, perspectives, strategies, stakes and vision, 4th international symposium on water, Palais des festivals, Cannes, France.

31. Lemmen, D.S., Warren, F.J., Lacroix, J., et Bush, E. (2008). *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 488 p.

32. Mailhot, A., Duchesne, S., Caya, D., et Talbot, G. (2007a). Assessment of future change in Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *J. Hydrol.*, 347(1-2), 197-210, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.09.019

33. Masmoudi, R., Kettab, A., Brémond, B., (2005): «Analysis of the distribution of drinking water in the Algerian south. Case of Biskra's region», *Al-Azhar universiyy engineering journal*, vol. 8, n°1, pp.250-254.

34. Sundhal A., (1997) :«Geographical analysis of water main pipe breaks in the city of Malmo, Sweden », *journal Aqua*, vol. 46, n°1, pp. 40-47.

35. Woodburn J., Lansey K., Mays L. W., (1987) :«Model for the optimal rehabilitation and replacement of water distribution components », *Proc. Hydraulic engineering*, Atlanta, pp.606-611.