

Данный файл представлен исключительно в ознакомительных целях.

Уважаемый читатель!

Если вы скопируете данный файл,

Вы должны незамедлительно удалить его сразу после ознакомления с содержанием.

Копируя и сохраняя его Вы принимаете на себя всю ответственность, согласно действующему международному законодательству .

Все авторские права на данный файл сохраняются за правообладателем.

Любое коммерческое и иное использование кроме предварительного ознакомления запрещено.

Публикация данного документа не преследует никакой коммерческой выгоды. Но такие документы способствуют быстрейшему профессиональному и духовному росту читателей и являются рекламой бумажных изданий таких документов.

На правах рукописи



Штейнмиллер Олег Адольфович

**ОПТИМИЗАЦИЯ
НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ
НА УРОВНЕ РАЙОННЫХ, КВАРТАЛЬНЫХ
И ВНУТРИДОМОВЫХ СЕТЕЙ**

Специальность 05.23.04 – Водоснабжение, канализация,
строительные системы охраны водных ресурсов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государствен-
ный архитектурно-строительный университет» на кафедре водоснабжения

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ким Аркадий Николаевич
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Васильев Виктор Михайлович
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

кандидат технических наук, доцент
Авсюкевич Алексей Петрович
(ЗАО «Экопром», Санкт-Петербург»)

Ведущая организация: ЗАО «Водопроект-Гипрокоммунводоканал.
Санкт-Петербург»

Защита состоится 01 июля 2010 года в 14-00 час. на заседании
диссертационного совета Д 212.223.06 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-строительный университет» по адресу:
190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний.

Тел./факс (812) 316-58-72.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-
Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Автореферат диссертации размещен на официальном сайте ГОУ ВПО
«Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный универ-
ситет» (www.spbgasu.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью пред-
приятия, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан 31 мая 2010 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



В.Ф.Васильев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Определяющую часть затрат на водоснабжение составляют эксплуатационные расходы систем подачи и распределения воды (СПРВ), продолжающие увеличиваться в связи с ростом тарифов на электроэнергию. С целью снижения энергоемкости большое значение придается оптимизации СПРВ. Насосные станции, как один из основных структурных элементов, во многом определяют эксплуатационные и экономические показатели работы СПРВ. По авторитетным оценкам, до 50 % энергозатрат насосных систем может быть сокращено за счет изменения насосного оборудования и способов управления.

Состояние городских магистральных сетей привело к необходимости снижения давления, что потребовало компенсировать соответствующее падение напора на участках, приближенных к потребителям. Износ оборудования повысительных насосных станций (ПНС) обострил необходимость их реконструкции для повышения надежности и КПД. С другой стороны, развитие городов и увеличение высотности домов, особенно при уплотнительной застройке, требуют обеспечения потребных напоров для новых потребителей, в том числе за счет оснащения нагнетателями домов повышенной этажности (ДПЭ). Совокупность указанных факторов является основанием постановки задачи определения оптимальных параметров ПНС при имеющихся ограничениях входных напоров, в условиях неопределенности и неравномерности фактических расходов.

Поэтому представляется актуальным совершенствование методологических подходов, разработка моделей и комплексного обеспечения принятия решений, позволяющих оптимизировать параметры повысительного насосного оборудования периферийных участков сети, в том числе при подготовке проектов. Распределение потребного напора между насосными узлами, а также определение в пределах узлов оптимального числа и типа насосных агрегатов с учетом расчетной подачи, обеспечат анализ вариантов схем периферийной сети. Полученные результаты могут быть интегрированы в задачу оптимизации СПРВ в целом.

Целью работы являлись исследование и разработка оптимальных решений при выборе повысительного насосного оборудования периферийных участков СПРВ в процессе подготовки реконструкции и строительства, включая методическое, математическое и техническое (диагностическое) обеспечение.

Для достижения цели в работе решались следующие **задачи**:

- анализ практики в сфере повысительных насосных систем с учетом возможностей современных насосов и методов регулирования, сочетания последовательной и параллельной работы с частотным регулированием привода (ЧРП);
- определение методического подхода (концепции) оптимизации повысительного насосного оборудования СПРВ в условиях ограниченности ресурсов;
- разработка математических моделей, формализующих задачу выбора насосного оборудования периферийных участков водопроводной сети;
- анализ и разработка алгоритмов численных методов для исследования предложенных в диссертации математических моделей;
- разработка и практическая реализация механизма сбора исходных данных для решения задач реконструкции и проектирования новых ПНС;
- реализация имитационной модели формирования стоимости жизненного цикла по рассматриваемому варианту оборудования ПНС.

Научная новизна. Представлена концепция периферийного моделирования подачи воды в контексте сокращения энергоемкости СПРВ и снижения стоимости жизненного цикла «периферийного» насосного оборудования.

Разработаны математические модели для рационального выбора параметров насосных станций с учетом структурной взаимосвязи и полирежимного характера функционирования периферийных элементов СПРВ.

Теоретически обоснован подход к выбору числа нагнетателей в составе ПНС (насосных установок); проведено исследование функции стоимости жизненного цикла ПНС в зависимости от числа нагнетателей.

Разработаны специальные алгоритмы поиска экстремумов функций многих переменных, основанные на градиентных и случайных методах, для исследования оптимальных конфигураций насосных станций на периферийных участках.

Создан мобильный измерительный комплекс (МИК) для диагностики действующих повысительных насосных систем, запатентованный в полезной модели № 81817 «Система контроля подачи воды».

Определена методика выбора оптимального варианта насосного оборудования ПНС на базе имитационного моделирования стоимости жизненного цикла.

Практическая значимость и реализация результатов работы. Даны рекомендации по выбору типа насосов для повысительных установок и ПНС на основе уточненной классификации современного насосного оборудования для повышения напора в системах водоснабжения с учетом таксонометрического деления, эксплуатационных, конструктивных и технологических признаков.

Математические модели ПНС периферийных участков СПРВ позволяют снизить стоимость жизненного цикла за счет выявления «резервов», в первую очередь в части энергоемкости. Предложены численные алгоритмы, позволяющие доводить до конкретных значений решение оптимизационных задач.

Разработано специальное оперативное средство сбора и оценки исходных данных (МИК), используемое для обследования действующих систем водоснабжения при подготовке их реконструкции.

Подготовлены рекомендации по обследованию действующих повысительных систем водоснабжения с использованием МИК и подбору оборудования для ПНС (выбору проектного решения) на основе малогабаритных автоматических насосных станций (МАНС).

Результаты НИОКР реализованы на ряде объектов коммунального водоснабжения, включая ПНС и МАНС в домах повышенной этажности.

Методы исследований. В работе проводились теоретические и экспериментальные исследования, включая натурные измерения, использовались методы математического (аналитического и имитационного) моделирования.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обоснована применением классических положений анализа, моделированием изучаемых процессов, подтверждена результатами других авторов. При постановке экспериментов применялись отработанные методики, в составе МИК использовались сертифицированные и прошедшие аттестацию оборудование и приборы. Достоверность полученных результатов обеспечена использованием математических методов обработки экспериментов (с применением компьютерных программ – пакета StatGraphics, табличного процессора Microsoft Excel).

На защиту выносятся:

– концепция «периферийного» моделирования СПРВ в контексте проблемы снижения энергоемкости и повышения надежности действующих СПРВ;

– математические модели задач оптимизации насосного оборудования на периферийном уровне СПРВ и специальные численные алгоритмы решения для исследования оптимальных конфигураций системы «ПНС – абонентская сеть»;

– принцип рационального выбора числа нагнетателей в составе ПНС и насосных установок (на основе минимизации стоимости жизненного цикла);

– система диагностического обследования (контроля) действующих ПНС на базе применения программно-аппаратного комплекса МИК для получения данных с целью дальнейшего определения оптимальных вариантов реконструкции;

– методика исследования и оценки эффективности на основе имитационного моделирования стоимости жизненного цикла периферийных повысительных компонентов для сравнения вариантов и обоснования выбора при проектировании.

Апробация результатов исследований и публикации. По материалам диссертации опубликовано 11 работ (из них 3 – в журнале, рекомендованном ВАК). Получен патент на полезную модель (№ 81817, опубликован в 2008 г.). Положения работы докладывались и обсуждались в Санкт-Петербурге и Москве на 7 конференциях, ряде семинаров и кафедре водоснабжения СПб ГАСУ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, библиографического списка литературы (107 наименований) и 3 приложений. Объем основной части работы – 165 страниц компьютерного текста, включая 61 рисунок и 21 таблицу. Приложения представлены на 21 странице компьютерного текста и содержат 11 рисунков и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность оптимизации параметров повысительного насосного оборудования периферийных участков СПРВ, определены цель и задачи работы, приведены основные положения: научная новизна, практическая значимость, данные о внедрении результатов работы.

Первая глава содержит обзор основ теории, применяемого оборудования и структурно-параметрических схем повышения напора. Значительный вклад в разработку тематики внесли отечественные ученые: Н.Н.Абрамов, М.М.Андрियाшев, Ю.А.Ильин, С.Н.Карамбилов, В.Я.Карелин, А.М.Курганов, Л.Ф.Мошнин, Е.А.Прегер, П.Д.Хорунжий, Ф.А.Шевелев и др. На основе литературных источников и практического опыта рассмотрены вопросы задач повышения напора. Функциональные параметры насосов (подача, напор) связаны с мощностными:

$$N_n = \rho \times g \times Q \times H = Q \times P, \quad \eta_n = N_n / N, \quad \eta_{ов} = N_2 / N_1, \quad \eta_{пр} = N / N_2, \quad \eta_a = \eta_{ов} \times \eta_{пр} \times \eta_n \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; Q – подача, м³/с; H – напор, м; P – давление, Па; N_n, N – полезная мощность и мощность (передаваемая от двигателя), Вт; N_1, N_2 – входная (потребляемая двигателем) и выходная (выдаваемая двигателем) мощности, Вт; $\eta_n, \eta_{пр}, \eta_{ов}, \eta_a$ – КПД насоса, передачи, двигателя, насосного агрегата в сборе.

Исходя из российской классификации, основанной на различиях в принципе действия, в группе динамических насосов выделим лопастные насосы, исполь-

зуемые на сооружениях водоснабжения и канализации. Напор лопастного насоса пропорционален частоте вращения n и диаметру D рабочего колеса. Для сравнения лопастных насосов используют коэффициент быстроходности n_s :

$$n_s = (3,65 \times n \times \sqrt{Q}) / H^{3/4}. \quad (2)$$

Уточнена классификация насосов для повышения напора в водоснабжении. Даны ответы на ряд вопросов: какие новации повлияли на эксплуатационную практику, как удалось добиться роста КПД, какие виды насосов получили распространение для повышения напора в водоснабжении? Совершенствование гидравлических характеристик многоступенчатых центробежных «ин-лайн» насосов – сокращение утечек от перепада давлений в насосе, улучшение геометрии колеса, снижение n_s – позволило повысить КПД на 10%. Возможность точного подбора в силу перекрытия диапазона подач и напоров, высокие КПД, надежность, частота пусков и более чем 10-летний опыт применения позволяют автору рекомендовать модель для повысительных установок на участках, приближенных к потребителю.

В открытых системах водоснабжения меняющийся объем жидкости транспортируется из одной точки в другие, требования системы постоянно меняются. Анализ методов регулирования рабочих параметров насоса для соответствия текущим потребностям показывает непроизводительные потери энергии при дроссельном регулировании (напор насоса больше потребного) и при регулировании байпасом (подача насоса больше потребной). Коррекция диаметра рабочего колеса неприменима из-за низкой оперативности. При подаче воды к потребителю эффективно применение ЧРП, изменяющего частоту вращения рабочего колеса (скорости насоса) с помощью преобразователя частоты тока (ПЧТ) и обеспечивающего уменьшением полезной, а также потребляемой мощности (рис. 1).

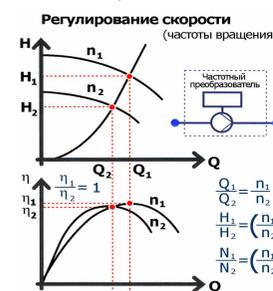


Рис. 1. Влияние скорости насоса (частоты вращения колеса) на его параметры

Однако важно, что при отклонении частоты вращения от номинальной (на которой КПД оптимален) КПД насоса снижается. При ЧРП снижается КПД двигателя из-за внутренних потерь ПЧТ и потерь на гармониках в электродвигателе. «Конструктивные» потери КПД насосного агрегата при ЧРП, приводящие к росту удельного энергопотребления (на примере насоса ТРЕ 40-300/2-S) – снижение скорости до 60% от номинальной уменьшает η_n на 11% относительно оптимального. Еще более значимо относительные энергозатраты и эффективность ЧРП зависят от условий эксплуатации (типа и характеристики системы, положения рабочих точек относительно максимума КПД), а также от критерия управления.

В открытых системах вершина характеристики, как правило, не совпадает с началом координат из-за статической составляющей напора, поэтому при использовании ЧРП рабочие точки не находятся на параболе подобных режимов, проходящей через точки с максимальным КПД. Управление по характеристике системы снижает избыточные напоры, но определять потребный напор по текущему значению расхода затруднительно в силу изменчивости положений текущей диктующей точки (при изменении количества мест потребления, расположения в сети и расхода в них) и вершины характеристики системы на оси напора.

До массового применения средств КИПиА и передачи данных возможна лишь «аппроксимация» управления по характеристике на основе частных для сети предположений, задающих набор диктующих точек или ограничивающих сверху характеристику системы в зависимости от расхода. Поэтому в большинстве пространственных систем водоснабжения управление ведется по критерию постоянного давления, при котором снижение КПД по мере уменьшения скорости насоса усиливается (при условии максимума КПД в точке пересечения характеристики насоса при номинальной частоте вращения и линии установленного давления).

Определяя эффективность ЧРП для конкретной системы, следует рассматривать и другие методы сокращения мощности, в первую очередь, с помощью совместной работы ряда насосов. При повышении напора в оконечных участках сети встают вопросы сочетания последовательной работы групп насосов, параллельной работы в группе и совмещения параллельной работы насосов с ЧРП.

С учетом ограничений на объем капложений маловероятно оперативное решение проблемы изношенности сетей. Вынужденное снижение напора в магистральных сетях для сокращения аварий и утечек приводит к поиску решений на периферии сети. Оптимальные параметры определяются при ограничениях входных напоров (подпоров) и неравномерности расхода. Целесообразно распределение напорных нагрузок между ПНС и насосными установками, которыми могут оснащаться дома повышенной этажности (ДПЭ). Подбор оптимального насосного оборудования предполагает сравнительную оценку выбираемого решения.

Во **второй главе** анализируется сложившаяся практика и тенденции применения насосного оборудования для обеспечения потребного напора на уровне районных, квартальных и внутридомовых сетей. Предъявлены результаты технической диагностики насосных систем с помощью разработанного МИК.

Вывод на потребные характеристики ПНС постройки 70–80-х годов (запроектированных на большую производительность) достигается дросселированием, насосы работают с низким КПД. Для «компенсационного» повышения напора в оконечных участках сети необходима замена оборудования на менее энергоемкое, под потребные напоры и расходы. Обобщая практический опыт работ, предложены рекомендации по проведению реконструкции насосных станций (НС), а также систем в ДПЭ, с учетом возможности их предварительного обследования.

На Московской НС работы, включающие снижение выходного давления с установкой насосов в ДПЭ, обточку колес для «подгонки» рабочей зоны характеристики к оптимуму КПД и устройство ЧРП, обеспечили снижение расхода электроэнергии с 44246,9 тыс. кВт·ч (за 2000 г.) до 33526,1 тыс. кВт·ч (за 2005 г.).

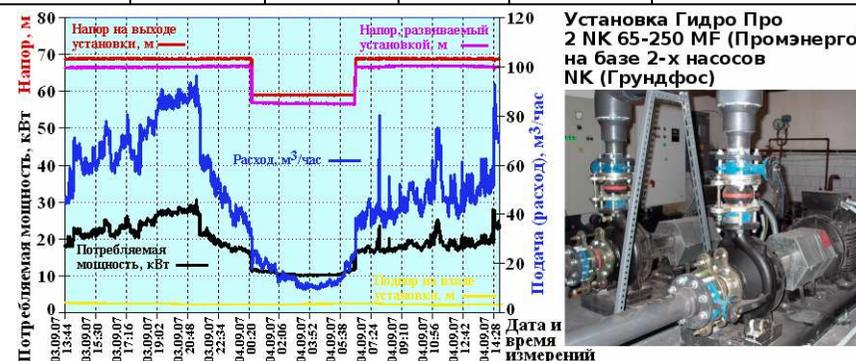
На Пулковской НС (табл. 1) на основе данных о расходах воды взамен насосных агрегатов 8НДв-60 (излишний напор гасился задвижкой), подающих воду

абонентам на Пулковских высотах, установлены насосы НК 65-250 (Грундфос) комплектно с системой управления и контроля ЩУ 120.2.90.78 MF (Промэнерго), имеющей в составе ПЧТ. По завершении работ проведены измерения параметров подачи воды в соответствии с методикой, представленной в главе 5. Результаты измерений – на диаграмме рис. 2 (дневной и ночной режим, стабильность выходного давления, широкий диапазон расхода, снижение потребляемой мощности).

Таблица 1.

Пулковская НС (СПб). Характеристики насосов 8НДв-60 и НК 65-250

Марка насоса	Q , м ³ /ч	H , м	N , кВт	Кол-во, шт.	Примечание
8НДв-60	720-540	89-94	250	2	Используемые ранее
НК 65-250	30-140	76-56	40	2	Новые



Установка Гидро Про 2 НК 65-250 MF (Промэнерго) на базе 2-х насосов НК (Грундфос)



Результаты измерений характеристик работы установки ГидроПро с помощью МИК
Рис. 2. Пулковская НС (СПб). Гидро Про 2 НК 65-250 MF (Промэнерго) с ЧРП

За период 2005 – 2007 гг. проведены реконструкции ПНС №№ 41, 50, 51. Взамен насосов типа «К» применены установки Промэнерго на базе насосов CR Грундфос. В табл. 2 – данные по насосам до и после замены. Применение ЧРП также позволило дополнительно сократить энергозатраты: насос CR 15-3 при расходе воды 13,2 м³/ч потребляет 2,3 кВт, а с ПЧТ – 1,43 кВт (на 38% меньше).

Таблица 2.

Насосы ПНС №№ 41, 50, 51 до и после реконструкции

ПНС	Насос	Эл./двигат.	Кол-во, шт.	Q , м ³ /ч	H , м	N , кВт	n , об/мин
<i>Характеристики насосов, эксплуатируемых до реконструкции</i>							
41	К 80 – 50	АО2-62-2	3	80	50	13,0	2820
50	К 90 – 55а	АО2-52-2	3	90	55	13,0	2980
51	К 90 – 55а	4А 16 052	3	90	55	15,0	2910
<i>Характеристики насосов в составе установок, эксплуатируемых после реконструкции</i>							
41	CR 20-3	MG (GR)	4	11-29	41-21	4,0	2900
50	CR 15-3	MG (GR)	4	8-22	40-25	3,0	2900
51	CR 10-5	MG (GR)	4	6-12	50-33	2,2	2900

Около 30% районных и квартальных сетей проложено из стальных труб, со временем подвергшихся коррозии и зарастанию отложениями. Чугунные трубы из-за длительного срока эксплуатации также требуют ремонта. Преодоление ограничений при повышении напора, накладываемых состоянием сетей, может достигаться «смещением» части напора к потребителю путем установки повысительного насосного оборудования в ДПЭ с сокращением давления в наружных сетях.

В 2005-2007 гг. на Гаванской НС (СПб) напор на выходе снизили с 63 м до 52 м (дневные часы) и 47 м (ночные часы). Для компенсации дефицита напора было увеличено выходное давление на ряде ПНС, а в 36 домах, не подключенных к ПНС, были установлены 2-х насосные установки с ЧРП, обеспечивающие после себя постоянное давление независимо от допустимых колебаний входного напора и расхода. Например, в системе ХВС 15-этажного дома (ул. Нахимова, 3, корп. 3) для повышения напора с учетом выбранного Заказчиком решения (1 насос рабочий, 1 – резервный) смонтирована МАНС ГидроПро 2 CR 3-6 MF (Промэнерго) со следующими диапазонами параметров насоса при номинальной частоте: подача от 1,2 до 4,5 м³/ч и напор от 38 до 13 м; потребляемая мощность 0,55 кВт.

Аналогичные задачи решались в 2007 г. по программе ГУП «Водоканал СПб» на массиве существующего фонда (Промэнерго обеспечило проектирование, производство, монтаж и наладку на 79 объектах – ДПЭ, основу составили МАНС с ЧРП на базе 2-х насосов CR). Реализации программы снизила остроту проблемы напоров и согласно расчетам обеспечила экономию электроэнергии на 308 тыс. кВт-ч/год, способствовала уменьшению потерь воды, снижению нагрузки на канализационные сети и ЦСА, сокращению затрат на аварийные работы. В настоящее время такие работы проводятся по заказам агентств и ТСЖ.

Подбор оптимального оборудования предполагает сравнительную оценку решений. На практике, для снижения первоначальных затрат, из рассмотрения часто исключаются решения с числом рабочих насосов более одного, эксплуатационные затраты мало влияют на выбор. В случае «1 – рабочий, 1 – резервный» весь диапазон подачи обеспечивается одним насосом.

Например, замеры расходов и напоров на вводе 15 этажного дома, проведенные до замены (рис. 3-1), показывают, что выбранный заказчиком насос абсолютно большую часть времени будет работать с подачей значительно меньше номинальной и, соответственно, при более низком КПД (рис. 3-2).

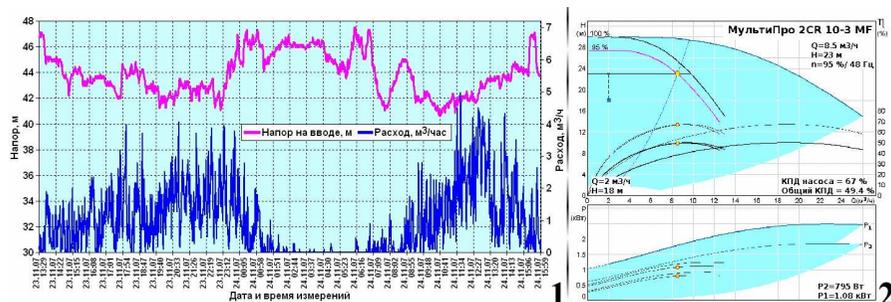


Рис. 3. СПб, ул. Нахимова, д. 7, корп. 3: 1) натурные замеры (МИК) расхода и напора; 2) параметры работы и характеристика МАНС МультиПро 2 CR 10-3 MF

Нередко для «перестраховки» выбирается насос, номинал подачи которого превышает реальный расход. Так, в жилом доме, по адресу СПб, Тихорецкий пр., 11, заказчик предпочел установку с рабочим насосом CR 5-8, что не соответствует данным измерений, при которых расход не превысил 2,8 м³/ч (рис. 4). Это приведет к перерасходу энергии из-за очень низкого КПД в диапазоне подач, снизит надежность и долговечность по причине подач ниже допустимых 10% номинала.

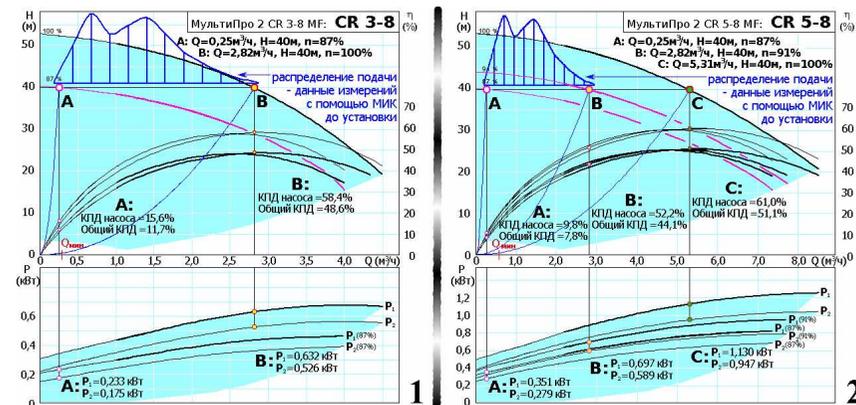


Рис. 4. Характеристики и режимы работы рабочих насосов в составе вариантов МАНС для нижней зоны (до 9 этажа) дома по адресу: СПб, Тихорецкий пр., д. 11

Отсутствие заинтересованности в эксплуатационной эффективности установок подтверждается преобладанием 2-х насосных установок (1 - рабочий), особенно среди установок с ЧРП, используемых, как правило, в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения, и в первую очередь, жилых зданий (табл. 3).

Таблица 3.

Поставки насосных установок (Промэнерго, 04.2007 г. – 03.2009 г.)

Тип поставляемых повысительных установок – по числу насосов (производители установок)	Количество (в разрезе схем управления)			Всего установок
	Противопожарная	Ступенчатая (каскадная)	Регулируем. (ступ.+ЧРП)	
1-но насосные	0 (-/-)	0 (-/-)	1 (-/1)	1 (-/1)
2-х насосные	31 (4/27)	17 (4/13)	106 (15/91)	154 (23/131)
3-х насосные	21 (-/21)	8 (5/3)	32 (18/14)	61 (23/38)
4-х насосные	1 (-/1)	2 (1/1)	11 (3/8)	14 (4/10)
Итого (Grundfos/Промэнерго)	53 (4/49)	27 (10/17)	150 (36/114)	230 (50/180)

На основании обобщения опыта автором предложены рекомендации по организации работ в ДПЭ. Более высокая эффективность и надежность установок достигается за счет реального сочетания ступенчатого (каскадного) и плавного (частотного) регулирования. Для преодоления эмпирического характера подбора целесообразна разработка модели оптимизации параметров насосного оборудования периферийных участков сети, которая позволила бы анализировать возможные схемы сети с распределением параметра напора между насосными узлами и определением оптимального числа насосов в пределах оснащенных узлов.

Определяя концепцию периферийного моделирования подачи воды в контексте сокращения энергоемкости СПРВ в целом и стоимости жизненного цикла периферийного насосного оборудования, отметим, что поиск решений в оконечных участках сети представляется возможным в силу декомпозиции модели СПРВ на 2 принципиальных уровня:

- нижний (магистральный) уровень сети (НС II и последующих подъемов по критерию отсутствия прямых подключений конечных потребителей);
- верхний (периферийный) уровень сети (НС завершающих подъемов, а также внутримодовые подкачки).

Системы верхнего уровня являются подходящим объектом исследования в рамках теории гидравлических цепей (ТГЦ), основы ТГЦ изложены в работах А.Г.Евдокимова, А.П.Меренкова, М.А.Сомова, С.В.Сумарокова, А.Д.Тевяшева, В.Я.Хасилева, В.Р.Чупина и др. Опираясь на способы моделирования систем пространственной структуры с насосными станциями, определена общая постановка оптимизационной задачи верхнего (периферийного) уровня водопроводной сети.

Третья глава диссертации посвящена вопросам математического моделирования при решении задач рационального выбора насосного оборудования ПНС. В рамках теории гидравлических цепей (ТГЦ) удалось формализовать подход к построению математических моделей для решения задач параметрической оптимизации насосного оборудования на периферийном уровне СПРВ.

Согласно терминологии ТГЦ математические модели водопроводных сетей – нелинейные гидравлические цепи, структура которых моделируется конечными ориентированными связными графами, а потокораспределение определяется законами сохранения массы и энергии. В работе предложен унифицированный подход к построению математических моделей и разработан специальный алгоритм численного метода для решения задач оптимального синтеза, основанный на исследовании пространства возможных состояний гидравлической цепи и выявлении тех из них, которые оптимизируют значения целевого функционала.

Систему «районная ПНС – абонентская сеть» представим ориентированным графом (рис. 5). Пусть целевой функционал описывает энергетические затраты на транспортирование воды от узла, примыкающего к магистральной сети СПРВ, до конечных потребителей. Задача минимизации целевой функции в рамках ТГЦ может быть представлена в виде (3) – (11), см. рис. 5.

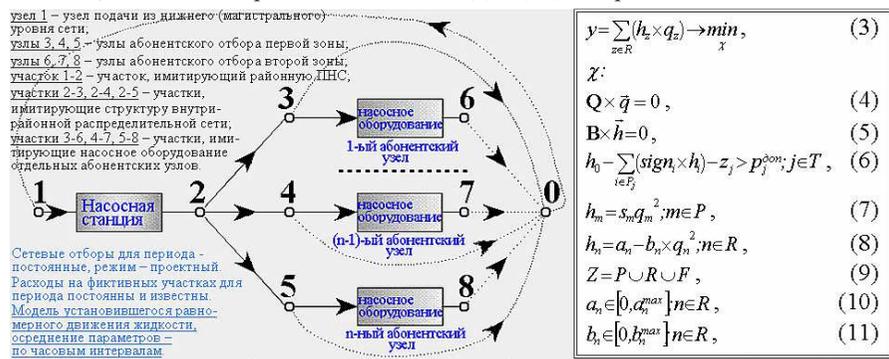


Рис. 5. Районная ПНС – абонентская сеть. Модель параметрической оптимизации

Задача минимизации целевой функции решается относительно определяемых наборов коэффициентов a и b насосного оборудования на ПНС и у абонентов. Последовательно продвигаясь от базовой постановки (3) – (11) к более адекватным реальности и сложным формулировкам, в работе рассмотрены несколько групп задач оптимального синтеза: минимизации энергетического функционала с

учетом полирежимного характера функционирования системы, в условиях применения ЧРП, при каскадном (КР) и каскадно-частотном регулировании (КЧР).

Полирежимный характер учитывается введением новой целевой функции, отражающей средневзвешенную мощность работающего в течение всего диапазона моделирования (например, суток) насосного оборудования

$$y = \frac{\sum_w \left(T_w \times \sum_{z \in R} (h_{z,w} \times q_{z,w}) \right)}{\sum_w T_w} \rightarrow \min_x, \quad (12)$$

где T_w – продолжительность w -го временного периода.

В итоговой модели для учета затрат потребляемой мощности в целевую функцию будут дополнительно введены параметры КПД работающих агрегатов.

При возможности регулировать параметры единственного нагнетателя на каждой НС за счет ЧРП для идентификации его рабочей характеристики предлагается специальный алгоритм, основанный на сопоставлении оптимальной режимной точки нагнетателя при номинальной частоте вращения серии гидродинамически подобных насосов. Для определения серии используется коэффициент быстроходности n_s , по значению которого задается интервал изменения некоего параметра G_n , позволяющего идентифицировать коэффициенты a_n и b_n .

$$a_n = G_n \times H_{норт}, \quad b_n = (G_n \times H_{норт} - H_{норт}) / Q_{норт}^2 = (G_n - 1) \times H_{норт} / Q_{норт}^2, \quad (13)$$

где $Q_{норт}$ – подача насоса при наибольшем КПД на номинальной скорости, соответствующая расходу с наибольшей повторяемостью (по результатам стратификации данных о соответствующем фактическом водопотреблении); $H_{норт}$ – определенная при минимизации функционала (3) величина оптимального напора для сетевого отбора, соответствующего $Q_{норт}$, и при виде условия (8) $h_n = H_{норт}$ и условия (10) $H_{норт} \in [0, a_n^{max}]$, $n \in R$; параметр G_n определен интервально $1,05 \leq G < 1,08$ при $n_s \in [40, 80]$, $1,08 \leq G < 1,15$ при $n_s \in [80, 150]$, $1,15 \leq G < 1,25$ при $n_s \in [150, 250]$.

При идентификации коэффициентов a_n и b_n следует обеспечить условие – нагнетатель должен развивать потребный напор на всем диапазоне возможных подач без увеличения частоты вращения рабочего колеса выше номинальной.

В условиях каскадного управления идентификация подложит рабочая характеристика отдельного нагнетателя. Если каждая насосная установка – каскадно регулируемая (НУКР), и нагнетатели в составе отдельной НУКР эквивалентны, то при задании области допустимых решений (4) – (11) некоторую модификацию претерпевают лишь уравнения (8), которые для каждого w -го периода потребления имеют вид: $h_{n,w} = a_n - k p_{n,w} \times b_n \times q_{n,w}^2$, $n \in R$.

Коэффициент $k p_{n,w}$, учитывающий количество $L_{n,w}$ одновременно включенных в работу насосов для w -го периода в составе n -ной НУКР, определяется как $k p_{n,w} = 1 / L_{n,w}^2$, при этом $L_{n,w} = \lceil q_{n,w} / Q_n \rceil$, где номинальная подача одного насоса $Q_n = \max(q_{n,w}) / K$, $n \in R$, K – общее число рабочих насосов в составе одной НУКР, $\lceil \rceil$ – функция потолка (Кеннет Айверсон).

При использовании насосных установок с каскадно-частотным регулированием (НУКЧР) в условиях управления по поддержанию постоянного давления на выходе установки (при произвольной подаче) встает вопрос определения коэффициентов $a_{n_{pez}}$ и $b_{n_{pez}}$ регулируемого насоса при текущей частоте вращения $n_{n_{pez}}$. Для подобных режимов величина внутреннего гидравлического сопротивления насоса не меняется, характеристики при номинальной и уменьшенной частотах вращения параллельны друг другу, поэтому

$$H = a_n - b_n \times Q_n^2, \quad b_{n_{pez}} = b_n, \quad n_{n_{pez}} = n_n \times \sqrt{(H + b_{n_{pez}} \times Q_n^2) / a_n}, \quad a_{n_{pez}} = a_n \times (n_{n_{pez}} / n_n)^2, \quad (14)$$

где a_n, b_n – коэффициенты приведенной характеристики насоса при номинальной скорости; n_n – номинальная частота вращения рабочего колеса насоса, Q_n – подача насоса при номинальной скорости; $Q_{n_{pez}}$ – легко определяемая («недостающая»), приходящаяся на регулируемый насос подача, H – напор насоса, обеспечивающий заданное давление.

В различные временные периоды (моменты) на насосных станциях функционирует (обеспечивает текущую подачу) различный состав нагнетателей с изменением частоты вращения рабочих колес отдельных из них. Важное практическое значение имеет задача определения оптимального числа рабочих агрегатов ПНС при использовании КЧР. Энергоэффективность растет с увеличением числа рабочих насосов K за счет повышения точности аппроксимации потребной нагрузки, однако в целом требуется минимизировать не энергетические затраты, а общую стоимость системы. Забегая вперед отметим, что в методическом плане подход основан на учете стоимости жизненного цикла оборудования – совокупных затрат на строительство (реконструкцию), эксплуатацию (в течение расчетного периода) и завершение использования.

Анализ стоимости жизненного цикла (в зарубежной практике принято сокращение LCC – Life Cycle Cost) помогает повысить эффективность систем. Для «затратных» инвестиционных проектов при выборе оборудования задача сводится к выбору варианта, минимизирующего совокупные дисконтированные затраты.

$$LCCD = C_{IC} + C_{IN} + \sum_{t=1}^{T_{cl}} \frac{C_E(t) + C_O(t) + C_M(t) + C_S(t) + C_{ENV}(t)}{(1+r)^t} + \frac{C_D}{(1+r)^{T_{cl}}}, \quad (15)$$

где $LCCD$ – совокупные дисконтированные затраты за жизненный цикл оборудования; t – текущий шаг расчетного периода; T_{cl} – срок службы; r – расчетная норма дисконта; C_{IC} – начальные затраты (цена); C_{IN} – затраты на монтаж и ввод в эксплуатацию (включая обучение персонала); $C_E(t) + C_O(t) + C_M(t) + C_S(t) + C_{ENV}(t)$ – сумма эксплуатационных затрат в течение шага t , соответственно: на электроэнергию (привод, средства управления и устройства), операционные (оплата персонала, обеспечивающего текущее обслуживание), на сервисное обслуживание и ремонт (регулярный сервис и плановый ремонт), на производственные потери (простой вне эксплуатации), на экологию (устранение последствий загрязнения от работы оборудования); C_D – затраты на списание и утилизацию (включая восстановление окружающей среды, ликвидацию вспомогательного оборудования).

Наиболее значимый вклад в $LCCD$ насосного оборудования вносят затраты на электроэнергию. Для ПНС в силу отсутствия постоянного обслуживания и

большой наработки насосов (более 2000 часов в год) распределение еще более сдвигается в сторону преобладания энергозатрат. Это позволяет произвести декомпозицию задачи исследования поискового пространства (модель на рис. 6):

– на внешнем цикле варьировать число рабочих насосов насосных станций K , определять стоимость жизненного цикла для каждого K (опираясь на полученное в рамках внутреннего цикла оптимальное решение), выбирая в итоге наилучшее из оптимальных решений, обеспечивающее минимальную стоимость;

– на внутреннем цикле искать набор $\{a, b\}$, минимизирующий осредненную за расчетный временной период потребляемую мощность системы для данного K .

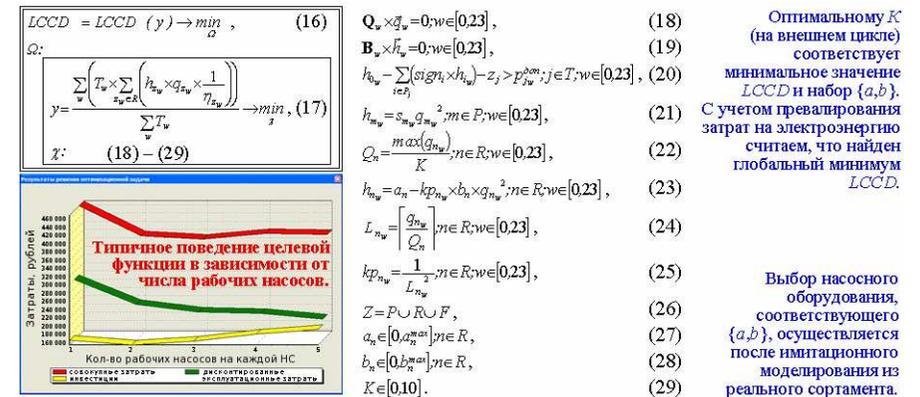


Рис. 6. Задача об отыскании минимума стоимости жизненного цикла $LCCD$ (и двойственная задача определения оптимального числа рабочих насосов НС)

Каждому полученному при решении оптимизационной задачи (17) набору $\{a, b\}$ соответствует некая сумма $LCCD$. Оптимальному K , определяемому на внешнем цикле по критерию минимума $LCCD$, соответствует свой набор $\{a, b\}$. С учетом превалирования энергозатрат можно считать, что в результате решения найден глобальный минимум стоимости жизненного цикла.

Предложенная модель – способ снижения стоимости жизненного цикла насосного оборудования периферийных участков за счет выявления «узких» мест действующих и проектируемых систем в части энергоемкости. Модельное решение теоретически обосновывает число нагнетателей в составе ПНС и насосных установок. Аналогично строится вычислительная схема решения оптимизационной задачи в условиях различных K для отдельных насосных станций. При исследовании функции стоимости жизненного цикла в зависимости от числа нагнетателей для действующих систем оптимальное число рабочих насосов в составе НС составляло, как правило, 3 – 4 единицы. Типичное поведение целевой функции в зависимости от числа рабочих насосов таких НС представлено на рис. 6.

Окончательное решение о выборе насосного оборудования, соответствующего полученному при решении оптимизационной задачи набору коэффициентов, принимается после имитационного моделирования с фактическими $\{a, b\}$ из имеющегося сортамента (см. главу 5). Тогда же уточняются параметры энергопотребления системы, КПД ее составляющих и затраты за весь жизненный цикл.

В четвертой главе работы рассматриваются особенности реализации численных схем решения задач параметрической оптимизации насосного оборудования, а также методы получения информации о характере потребления абонентских узлов системы, необходимой для математического моделирования.

Методами статистического анализа показана ярко выраженная регулярность режима водопотребления отдельных зданий, что позволяет использовать для описания относительно небольшие периоды, корректируя при необходимости данные разными коэффициентами неравномерности с учетом времени измерений. Для описания исходных данных задач оптимизации насосного оборудования используются метод определения коэффициентов часовой неравномерности на основе модели мультипликативной сезонной декомпозиции или метод, основанный на частотном распределении расходов в исследуемом временном ряду (рис. 7).

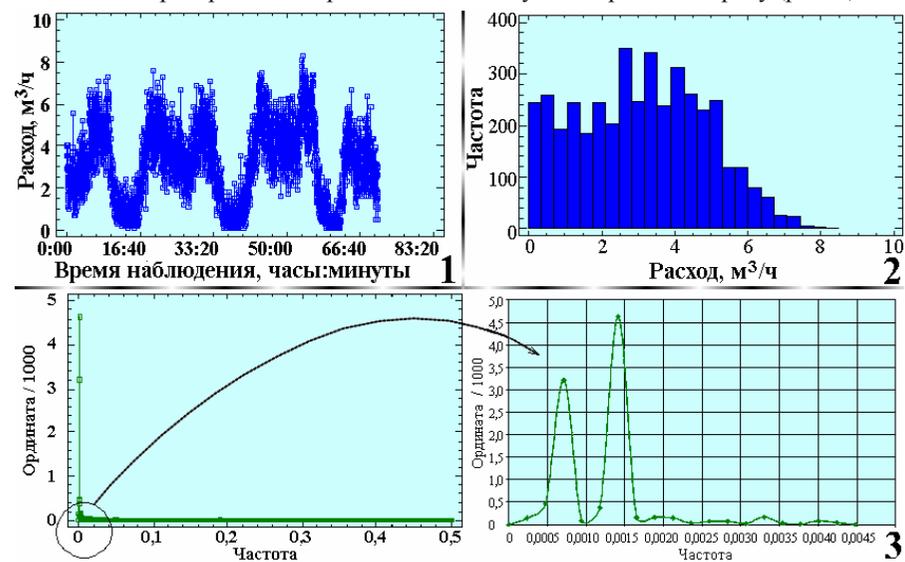


Рис 7. Исследуемый временной ряд:

1) Базовая статистика. 2) Частотное распределение расходов. 3) Периодограмма

Рассмотрены методы построения аналитических выражений для описания характеристик нагнетателей. Рабочие характеристики насосов представлены в виде $H=a-b \times Q^2$, где H – напор насоса при его подаче Q , a и b – некоторые параметры. Аппроксимация характеристик при разработке выполняется по методу наименьших квадратов (методу Гаусса). Для описания КПД двигателей используются многочлены вида $\eta=A+B \times Q+C \times Q^2$, а для КПД насосов – вида $\eta=A \times Q+B \times Q^2$, хорошо отражающие характеристики каталогов и удобные для использования. Отметим полуэмпирическую формулу связи КПД насоса при номинальной частоте n_0 и частоте регулирования $n < n_0$:

$$\eta_n = \eta_n(Q, n) = 2 \times \left(\frac{1 - (1 + A^2 / (4 \times B)) \times (n_0 / n)^{0.1}}{-(n / n_0) \times A / (2 \times B)} \right) \times Q - \left(\frac{1 - (1 + A^2 / (4 \times B)) \times (n_0 / n)^{0.1}}{((n / n_0) \times A / (2 \times B))^2} \right) \times Q^2, \quad (30)$$

где Q – подача насоса; A, B – коэффициенты в полиноме $\eta = A \times Q + B \times Q^2$, описывающем КПД насоса при номинальной частоте n_0 (на основе каталога).

В силу характера пространства возможных решений для исследования оптимальных конфигураций НС в составе периферийных участков потребовалась разработка специальных алгоритмов поиска экстремумов функций многих переменных, основанных на градиентных и случайных методах.

В работе на примере показано, что для решения простых задач параметрической оптимизации могут быть использованы градиентные методы поиска (метод штрафной функции). При ограничениях на решение $S(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min$ в виде неравенств $g_j(x_1, \dots, x_n) \leq 0, j=1, \dots, m$ и уравнений $h_k(x_1, \dots, x_n) = 0, k=1, \dots, t$, образующих пространство возможных решений χ , может быть введена функция вида:

$$\Phi(x_i, \gamma) = S(x_i) + \frac{1}{\gamma} \times \left(\sum_{k=1}^t h_k^2(x_i) + \sum_{j=1}^m g_j^2(x_i) \times (1 + \text{sgn}(g_j)) \right), \quad (31)$$

где $\text{sgn}()$ – функция знака (возврат -1 , если значение параметра < 0 , и $+1$, если значение параметра ≥ 0), $\gamma > 0$ – некоторый положительный параметр.

Строение (31) таково, что при наличии у функции $S(x_1, x_2, \dots, x_n)$ минимума в пространстве χ такой же минимум будет иметь и функция $\Phi(x_1, x_2, \dots, x_n, \gamma)$.

К сожалению, для реальных задач высокой размерности предложенную схему поиска минимума реализовать сложно – на границе допустимой области исследуемая функция имеет излом, затрудняющий поиск стандартными градиентными методами. Поэтому для поиска минимума целевой функции предложен специальный алгоритм (модифицированный план Холланда), сочетающий основные достоинства градиентных и случайных методов исследования пространства.

В пространстве возможных решений χ выделим некоторое количество M наборов коэффициентов a и b (описывающих насосное оборудование). Один набор a и b определяет структуру A – экземпляр решения. Совокупность начальных экземпляров решения, (полученных с помощью генератора псевдослучайных чисел) будем называть начальным планом, обозначив его $\mathbf{B}(0)$.

Для каждого экземпляра из $\mathbf{B}(0)$ единственным образом определено значение целевой функции. Совокупность значений целевой функции всех экземпляров из $\mathbf{B}(0)$ определяет вектор $v(0) = (\mu_1(0), \dots, \mu_M(0))$. Определим среднее значение целевой функции экземпляров $\mathbf{B}(0)$ как $\bar{\mu}(0) = \sum_{i=1}^M \mu_i(0) / M$. Для маркировки итераций будем использовать переменную t (для начального плана $t=0$). Дальнейший алгоритм поиска оптимального плана циклично повторяет следующие шаги.

1. Выбор экземпляров для улучшения. Следующая итерация $t=t+1$. Определяется случайная переменная Rand_t на множестве $\xi_M = \{1, \dots, M\}$ с вероятностью любого $f \in \xi_M$ пропорционально $\bar{\mu}(t-1) / \mu_f(t-1)$. Испытание Rand_t – результат $v(t)$ определяет номер первого экземпляра из $\mathbf{B}(t-1)$ для улучшения, повторным испытанием определяется номер второго экземпляра $v'(t)$ из $\mathbf{B}(t-1)$ для улучшения.

2. **Формирование улучшенного экземпляра.** С вероятностью P_c – рекомбинация отдельных фрагментов экземпляров с номерами $v(t)$ и $v'(t)$ из $\mathbf{B}(t-1)$. С вероятностью 0,5 выбирается один из рекомбинированных экземпляров и сохраняется как $\mathbf{A}(t)^1$. С вероятностью P_i – случайная замена отдельных элементов в наборах a и b данного экземпляра $\mathbf{A}(t)^1$.

3. **Отбор экземпляра для элиминирования и замена его улучшенным.** С равной вероятностью $1/M$ для всех $f \in \xi_M$ определяется случайным образом номер $\alpha(t)$ экземпляра из $\mathbf{B}(t-1)$ для замены на $\mathbf{A}(t)^1$. Обновляется текущий план $\mathbf{B}(t)$ путем переноса всех экземпляров из $\mathbf{B}(t-1)$ и замены $\mathbf{A}_{\alpha(t)}$ на $\mathbf{A}(t)^1$.

4. **Определение целевой функции нового экземпляра.** Вычисляется целевая функция $\mu(\mathbf{A}(t)^1)$. Обновление $v(t) = (\mu_1(t), \dots, \mu_M(t))$, $\mu(t) = \sum_{h=1}^M \mu_h(t) / M$. Переход к шагу 1.

При достижении требуемого значения целевой функции алгоритм завершает работу. Процедура оптимизации основана на циклической рекомбинации лучших экземпляров текущего плана. На рис. 8 приводятся пояснения относительно смысла процедуры рекомбинации двух лучших экземпляров. Там же показан характер изменения среднего значения целевой функции $\mu(t)$, где также выделен (описан) ряд характерных областей в ходе оптимизационного процесса.

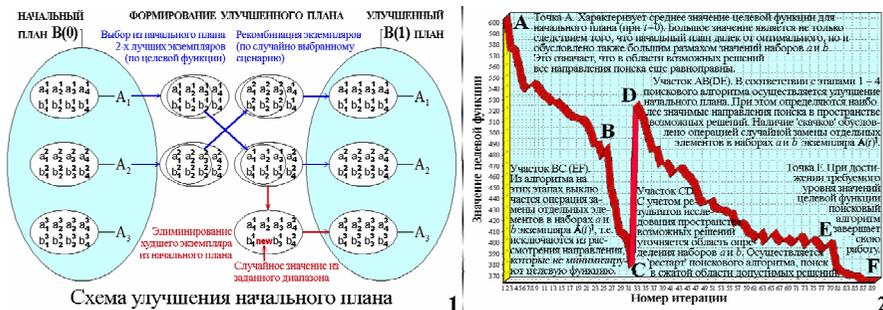


Рис. 8. Модифицированный план Холланда. 1) Схема улучшения начального плана. 2) Типичное изменение среднего значения целевой функции

В **пятой главе** представлена разработанная методика исследования и оценки сравнительной эффективности повысительных компонентов на периферийных участках СПРВ, обеспечивающая принятие обоснованного решения по выбору варианта насосного оборудования как при проектировании новых, так и при реконструкции действующих ПНС, а также установок в ДПЭ.

Как уже отмечалось, подход основан на учете стоимости жизненного цикла оборудования и выборе варианта, минимизирующего совокупные дисконтированные затраты (15). Решение задачи оптимизации должно быть получено в рамках «внешней» задачи об отыскании минимальной стоимости жизненного цикла, сформулированной в главе 3 в форме (16) – (29). Согласно указанной задаче $LCCD = LCCD(y) \rightarrow \min$, при этом в качестве целевой функции, характеризующей общую эффективность системы, в главе 5 была выбрана обобщенная форма (15).

Стоимость насосного оборудования может быть определена в зависимости от номинальной подачи насоса Q_0 (м³/ч) в составе установки (при максимуме КПД), напора H_0 (м.в.с.), соответствующего Q_0 , и количества насосов K_Σ в составе установки. Дополнительные вложения, затраты на установку и пуск насосного оборудования сопоставимы с его стоимостью. Совокупная мощность (N) находящихся в работе насосов позволяет оценить затраты на электроэнергию. Затраты на обслуживающий персонал, сервис и запасные части для периферийных повысительных компонентов согласно экспертным оценкам могут быть оценены на уровне 50% от энергозатрат. Предполагая ежегодное 8%-ное удорожание электроэнергии и других эксплуатационных затрат по годам расчетного периода ($T=8$ лет), пренебрегая затратами на простой и ликвидацию, считая один насос резервным, определим функцию экспресс-оценки совокупных дисконтированных затрат за жизненный цикл повысительного насосного оборудования (в евро):

$$LCCD = K_\Sigma \times (1694 + Q_0 \times H_0 \times 2,3292) + 17476,2 \times ((K_\Sigma - 1) \times N \times z_N) \times \sum_{r=1}^8 \frac{1}{(1+r)^r}, \quad (32)$$

где z_N – стоимость электроэнергии, евро за кВт/ч; r – расчетная норма дисконта, на уровне ставки ЦБ РФ (при 10% $r=0,10$).

Более точно составляющие жизненного цикла можно оценить, располагая информацией об оборудовании и нагрузках в рассматриваемой части СПРВ. Моделирование системы на базе оптимизационных задач предполагает наличие информации о характере потребления абонентских узлов, значениях расходно-напорных и электрических параметров предполагаемого к замене оборудования.

С целью обеспечения сбора и начальной обработки данных разработан Мобильный Измерительный Комплекс (МИК). Внешний вид МИК и схема размещения его компонентов для работы представлены на рис. 9.

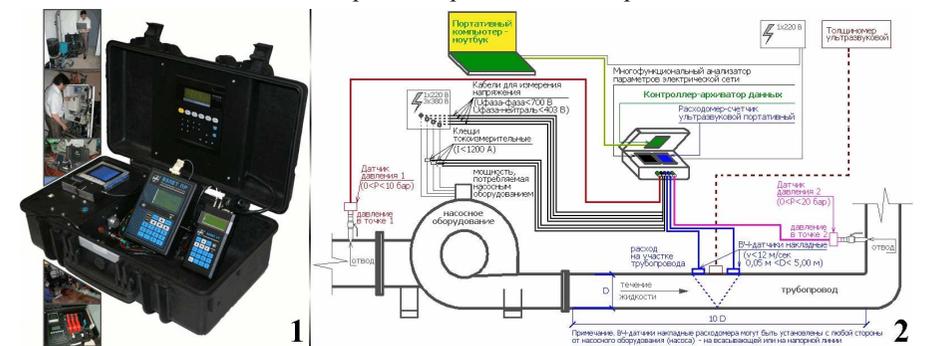


Рис. 9. МИК. 1) Внешний вид. 2) Схема установки компонентов для замеров

Часто необходимо оценить возможности реконструкции действующей ПНС с заменой оборудования на соответствующее фактическим параметрам и, как следствие, более эффективное. Для определения реального режима эксплуатации с помощью МИК проводится параметрический аудит насосов, в результате будут получены данные о значениях основных параметров (подачи, входного/выходного напора и потребляемой мощности) за достаточный период. Порядок

подготовки и проведения измерений (обследования действующих повысительных систем водоснабжения) с использованием МИК приведен в диссертации.

С учетом опыта измерений ПНС завершающих подъемов рекомендуется запись с поминутным усреднением. Полученный файл (массивы результатов измерений параметров) конвертируется в Excel-таблицу (и диаграмму); значению одного параметра (среднему за минуту) поставлены в соответствии значения других параметров (средние за ту же минуту). На основании получаемых МИК данных, после решения задачи оптимизации выбираемый вариант насосного оборудования оценивается в рамках имитационной модели *LCCD*. Для иллюстрации методики оптимизационного комплекса рассмотрим пример оценки реконструкции ПНС (с заменой насосного оборудования на новое, соответствующее фактическим параметрам эксплуатации, более энергоэффективное).

Возвращаясь к замене в 2007 г. насосов на Пулковской НС (табл. 1 и рис. 2), примем условно результаты замеров (параметрического аудита) с помощью МИК после реконструкции за базовую статистику, обрабатывая которую получим частотное распределение расходов (абонентских отборов), как на рис. 7. Рассмотрим результаты моделирования и сравним эффективность модельного решения и принятого ранее при реконструкции. Задача минимизации стоимости жизненного цикла НС согласно оптимизационной модели (16) – (29), при одной НС и абонентах без насосного оборудования, решается расчетной схемой градиентного метода на базе соотношения (31). В качестве инструмента используем Microsoft Excel и макрос «Solver» («Поиск решения»). При моделировании насосов Пулковских высот минимум *LCCD* достигается при 4 рабочих насосах, с одним ЧРП (рис. 10).

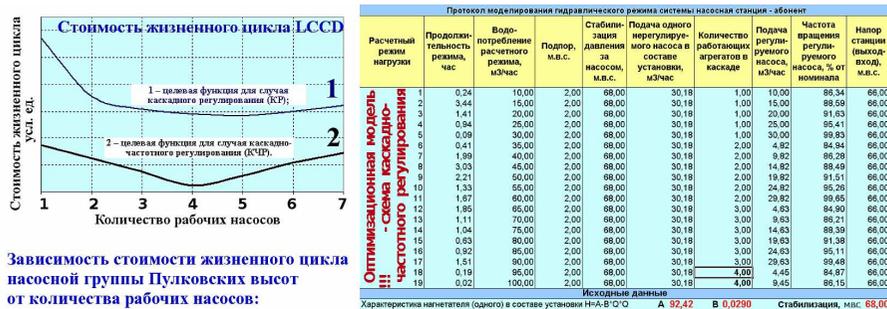


Рис. 10. Пулковская НС. Оптимизационный поиск коэффициентов *a* и *b*

Анализируя результаты, отметим характер функции стоимости жизненного цикла *LCCD* при различных способах регулирования (слева на рис. 10). При КР максимум «выигрыша» для *LCCD* получен при переходе от одного рабочего насоса к двум, при ЧЧР – выраженный оптимум *LCCD* при 4 рабочих агрегатах.

«Идеальным» рабочим характеристикам моделирования удовлетворяют насосы CR 32-5-2 (Grundfos). На следующем этапе с помощью имитационной модели оценивается энергопотребление выбранного комплекта насосного оборудования (впрямую по значениям расхода согласно данным измерений, при заданном выходном напоре) и рассчитывается стоимость жизненного цикла. Результаты имитации для МАНС 5 CR 32-5-2 (4 рабочих, 1 резервный) – на рис. 11.

Исходные данные										Протокол имитационного моделирования гидравлического режима системы насосная станция - абонент									
Техническая характеристика нагнетателя в составе станции в виде уравнения H=A+B*Q^2, H - напор, м. в. с., Q - расход, м³/час										Дата и время измерения									
A	92,42									Дата и время измерения	02.09.2007 13:44								
B	0,0299									Давление в входе насоса, м.в.с.	2,50								
2. КПД насоса (в %) КПД=H*Q/(P*Q), где Q - подача, м³/час										Давление в выходе насоса, м.в.с.	68,30								
A	5,3791									Напор насоса, м.в.с.	45,10								
B	-0,0965									Расход насоса, м³/час	45,10								
3. КПД привода (в %) КПД=H*Q/(P*Q), где Q - подача, м³/час										Максимальная мощность насоса, кВт	10,80								
A	66,00									Средняя мощность насоса в системе, кВт	3,01								
B	0,700									Подача насоса, м³/час	2,00								
4. Модель жизненного цикла LCCD										Частота вращения насоса, % от номинала	16,59								
1	0,100									Количество агрегатов в системе	2,00								
4.1. Стоимость электроэнергии, евро за 1 кВт·ч час										Подача регулируемого насоса в системе, м³/час	1,59								
1	0,10									Подача регулируемого насоса, % от номинала	78,62								
4.2. Уравнение зависимости, % за год										Подача регулируемого насоса, м³/час	16,59								
1	0,0									Подача регулируемого насоса, % от номинала	88,65								
4.3. Ставка инфляционного, % за год										Подача регулируемого насоса, м³/час	14,89								
1	10,0									Подача регулируемого насоса, % от номинала	88,65								
5. Дополнительные данные для моделирования										Подача регулируемого насоса, м³/час	15,99								
5.1. Максимальная подача регулируемого агрегата, м³/час, % от номинала подача										Подача регулируемого насоса, % от номинала	2,00								
1	10,00									Подача регулируемого насоса, м³/час	1,59								
5.2. Максимальная подача регулируемого агрегата, м³/час, % от номинала подача										Подача регулируемого насоса, % от номинала	2,00								
1	10,00									Подача регулируемого насоса, м³/час	1,59								

Рис. 11. Пулковская НС. Имитация затрат, оценка *LCCD* (МАНС 5 CR 32-5-2)

Сравнивая результат моделирования с нынешней ситуацией (2 НК 65-250, 1 рабочий, 1 резервный, с одним ЧРП), и опираясь на оценку стоимости жизненного цикла обоих вариантов, можно сделать вывод о более высокой эффективности оптимального проектного решения по сравнению с действующим (рис. 12). Если бы сравнение осуществлялось при принятии решения о реконструкции, то выбрать следовало бы МАНС 5 CR 32-5-2 несмотря на более высокую цену приобретения. Срок окупаемости дополнительных инвестиционных затрат, понесенных по сравнению с вариантом Гидро Про 2 НК 65-250 MF, составил бы около 4 лет. Такой результат получен несмотря на то, что максимальный КПД отдельного насоса НК 65-250 превышает аналогичный показатель насоса CR 32-5-2.

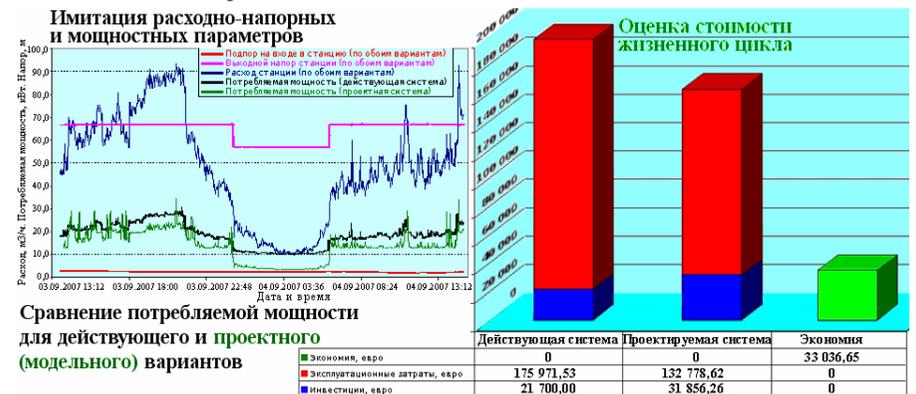


Рис. 12. Стоимость жизненного цикла действующего и модельного варианта

Обобщая представленный материал имитации, можно сделать вывод – экспертная оценка возможности и вариантов реконструкции ПНС с заменой насосного оборудования на новое (более эффективное) может быть реально подкреплена применением оптимизационного и имитационного моделирования. Результаты моделирования на основе данных параметрического аудита позволяют существенно повысить обоснованность оценок и выбора оборудования.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Технические новации в области насосного оборудования создали условия для изменений, влияющих на эксплуатационную практику в части надежности и экономии энергии. С другой стороны, совокупность ряда факторов (состояние сетей и оборудования, территориальное и высотное развитие городов) привела к необходимости нового подхода к реконструкции и развитию систем подачи воды. Проведенный анализ публикаций и накопленный практический опыт стали основанием постановки задачи определения оптимальных параметров повысительного насосного оборудования.

2. Предложена концепция периферийного моделирования, как развитие идеи перераспределения нагрузки между магистральной и распределительной частями системы с целью минимизации непроизводительных потерь и энергозатрат. Стабилизация избыточных напоров на конечных участках водопроводной сети обеспечит сокращение энергоемкости СПРВ.

3. Предложены оптимизационные модели для рационального выбора повысительного насосного оборудования периферийных участков сети с привлечением ТГЦ. Разработанная методология учитывает полирежимный характер функционирования, способы регулирования работы нагнетателей и их компоновку в составе НС, взаимодействия отдельных элементов системы с учетом обратной связи, а также разнообразие целевых функций, отражающих энергоэффективность системы или ее инвестиционную привлекательность.

4. Исследование оптимизационных моделей и верификация результатов моделирования действующих повысительных насосных систем позволили теоретически обосновать подход к выбору количества и параметров нагнетателей в составе ПНС (насосных установок) на основе принципа минимизации стоимости жизненного цикла (*LCCD*) насосного оборудования. Проведено исследование зависимости функции *LCCD* насосных установок от числа нагнетателей.

5. Разработаны специальные алгоритмы поиска экстремумов функций многих переменных для решения реальных задач оптимизации насосных станций на периферийных участках, сочетающие особенности градиентных и стохастических подходов исследования поисковых пространств. Алгоритм, основанный на модификации репродуктивного плана Холланда, позволяет решать рассматриваемые задачи без введения упрощающих предположений и замены дискретного характера пространства возможных решений на непрерывный.

6. Создан МИК для диагностики действующих повысительных насосных систем, запатентованный в полезной модели (№ 81817), обеспечивающий необходимую полноту и достоверность исходных данных для решения задач оптимального синтеза элементов СПРВ. Разработаны рекомендации по обследованию действующих повысительных систем водоснабжения с использованием МИК.

7. Разработана методика выбора оптимального варианта насосного оборудования ПНС на базе имитационного моделирования *LCCD*. Совокупность методических, математических и технических подходов работы позволяет осуществить поиск решения и выполнить сравнительную оценку действующих и новых нагнетателей с точки зрения их эффективности, рассчитать срок окупаемости инвестиций.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. Штейнмиллер О. А. Проблемы в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения зданий. Установки повышения давления / О. А. Штейнмиллер // Инженерные системы АВОК Северо-Запад. — СПб., 2004. — № 2 (14). — С. 26–28.

2. Ким А. Н. Проблемы в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения зданий. Установки повышения давления / А. Н. Ким, П. Н. Горячев, О. А. Штейнмиллер // Материалы 7-го международного форума HEAT&VENT. — М., 2005. — С. 54–59.

3. Ким А. Н. Оптимизация насосных систем подачи воды при различных напорно-расходных параметрах водопотребления / А. Н. Ким, О. А. Штейнмиллер // Сборник докладов 5-й международной НПК (в рамках выставки «Baltic Build — 2006»). — СПб., 2006. — С. 25–27.

4. Ким А. Н. Оптимизация насосных систем подачи воды / А. Н. Ким, О. А. Штейнмиллер // Доклады 64-й научной конференции. — СПб.: СПбГАСУ, 2007. — Ч. 2. — С. 44–48.

5. Патент на полезную модель № 81817, МПК G05B 15/00. Система контроля подачи воды / А. Н. Ким, О. А. Штейнмиллер. ; опубл. 2008, Бюлл. № 9.

6. Ким А. Н. Разработка мобильного измерительного комплекса (МИК) для оценки работы насосных систем / А. Н. Ким, О. А. Штейнмиллер, А. С. Миронов // Материалы 4-х академических чтений РААСН. — СПб., 2009. — С. 46–50.

7. Ким А. Н. Мобильный измерительный комплекс (МИК) и его использование для оценки работы насосных систем / А. Н. Ким, О. А. Штейнмиллер, А. С. Миронов // Доклады 66-й научной конференции. — СПб.: СПбГАСУ, 2009. — Ч. 2. — С. 66–70.

8. Штейнмиллер О. А. Задача оптимального синтеза повысительных систем подачи и распределения воды (СПРВ) микрорайона / О. А. Штейнмиллер, А. Н. Ким // Вестник гражданских инженеров. — 2009. — № 1 (18). — С. 80–84. **(из списка ВАК).**

9. Штейнмиллер О. А. Статическая и полирежимная оптимизация параметров насосного оборудования системы «районная насосная станция — абонентская сеть» / О. А. Штейнмиллер, А. Н. Ким // Вестник гражданских инженеров. — 2009. — № 2 (19). — С. 41–45. **(из списка ВАК).**

10. Штейнмиллер О. А. Численные методы решения задачи оптимального синтеза повысительных систем подачи и распределения воды микрорайона / О. А. Штейнмиллер // Вестник гражданских инженеров. — 2009. — № 4 (21). — С. 81–87. **(из списка ВАК).**

11. Штейнмиллер О. А. Оптимизация систем водоотведения, водоснабжения и водоподготовки. Вопросы энергоэффективности / О. А. Штейнмиллер // Инженерные системы АВОК Северо-Запад. Тематический выпуск «Реконструкция и эксплуатация». — СПб., 2009. — № 1 (39)–2 (42). — С. 38–41.

Компьютерная верстка И. А. Яблоковой

Подписано к печати 31.05.10. Формат 60x84 1/16. Бумага для цифровой печати.
Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 13077.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.
Отпечатано в типографии «Принтисса»,
197342, Санкт-Петербург, Белоостровская ул., д. 22