

На правах рукописи

**Клочко Алексей Константинович**

**Разработка концепции рационального проектирования газораспределительных сетей методом итерационного поиска**

05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция,  
кондиционирование воздуха,  
газоснабжение и освещение

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2012 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель: Жила Виктор Андреевич  
кандидат технических наук, доцент, профессор  
кафедры Теплотехники и теплогазоснабжения  
МГСУ

Официальные оппоненты: Бодров Валерий Иосифович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета.

Авдолимов Евгений МаксUTOвич, кандидат технических наук, доцент, декан факультета инженерных систем и экологии (ФГБОУ ВПО МГАКХиС).

Ведущая организация: ОАО «НИИсантехники», г. Москва

Защита состоится « » \_\_\_\_\_ 2012г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 007.001.01 при Научно исследовательском институте строительной физики РААСН, по адресу: Москва, 127238, Локомотивный проезд, д.21, светотехнический корпус; тел. (495)482-40-76, факс (495)482-40-60

С диссертацией можно ознакомиться в научно-методическом фонде НИИ строительной физики РААСН.

Автореферат разослан « » \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 007.001.01

Н.П.Умнякова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Необходимость развития научной методологии при планировании развития газовой отрасли обусловлена важностью бесперебойного и экономически эффективного удовлетворения внутреннего и внешнего спроса на газ, расширением единой системы газоснабжения России, совершенствованием организационной структуры газовой отрасли страны, что нашло отражение в энергетической стратегии России на период до 2030 года.

Опережение роста газопотребления над темпом развития сетей газораспределения и, как следствие, их работа в нерасчетных условиях, приводящих к частым нарушениям режимов газоснабжения, а также высокая аварийность, связанная со старением основных фондов топливно-энергетического комплекса (почти 60%) на рынке газоснабжения обуславливают актуальность ряда научных проблем, преследующих преимущественно оптимизационные цели:

- действующие нормативы газораспределения базируются на концепциях, обеспечивающих эксплуатационную надежность газораспределительной сети, как наиболее важного её показателя, но не устанавливают методы для снижения сметной стоимости и повышения экономичности её функционирования;
- в качестве критерия экономичности, в ряде случаев, принимаются металлоемкость или материальная характеристика проектируемой сети, которые не в полной мере характеризуют её стоимость и, поэтому, не позволяют качественно осуществлять выбор оптимального варианта системы газораспределения.

Таким образом, актуальной научной проблемой является разработка новых методов оптимизации газораспределительных систем, учитывающих всю совокупность ограничений, возложенных на проектируемую сеть газораспределения.

**Целью работы является** разработка научно обоснованной концепции проектирования и оценки эффективности систем газораспределения, поиска путей их развития для повышения инвестиционной привлекательности и социальной значимости надежного и безопасного газоснабжения.

**Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:**

- 1) Проведение сравнительного анализа существующих методов проектирования газораспределительных сетей и разработка нового метода их оптимального проектирования на основе метода итерационного поиска;
- 2) Выявление и анализ факторов, оказывающих влияние на конфигурацию оптимальной газораспределительной сети;
- 3) Разработка нового метода трассировки межпоселковых газопроводов и ответвлений от них на основе взвешенного метода наименьших квадратов;
- 4) Сбор и систематизация исходных данных для определения инвестиционной привлекательности газораспределительных систем и разработка математической модели зависимости стоимости прокладки газораспределительной сети от используемых материалов и типоразмеров труб;

5) Обоснование выбора критерия эффективности инвестиций в мероприятия по газораспределению.

***На защиту выносятся следующие результаты:***

- 1) Усовершенствованный метод итерационно-поисковой оптимизации конфигурации элементов газораспределительной сети;
- 2) Выявление факторов, влияющих на конфигурацию оптимальной газораспределительной сети. Такими факторами являются: используемый материал труб, объемы потребления газа абонентами сети, количество ступеней регулирования по давлению газа, месторасположение потребителей и условия их подключения к источнику газоснабжения.
- 3) Усовершенствованный метод трассировки межпоселковых газопроводов и ответвлений от них на основе взвешенного метода наименьших квадратов и критерий выбора оптимальной топологии ответвлений;
- 4) Математическая модель зависимости стоимости прокладки газораспределительной сети от ее диаметра и актуализированные значения расчетных коэффициентов общепринятых методик по определению стоимости ее прокладки;
- 5) Метод определения эффективности функционирования газораспределительных систем с использованием такого параметра, как срок их окупаемости.

***Научная новизна результатов диссертации состоит в:***

- 1) разработке нового метода определения оптимальной конфигурации газораспределительных сетей на основе математического метода итерационного поиска, позволяющего осуществлять оптимизацию с учетом заданного в качестве целевой функции параметра. Отличительными особенностями предложенного метода являются знакопеременное изменение варьируемых параметров; введение иерархии условий, контролирующих текущее состояние поиска оптимального решения; возможность осуществления оптимизации из любого стартового положения поиска;
- 2) классификации на две группы параметров, влияющих на формирование газораспределительной сети: 1 - оказывающих влияние на выбор схемы сети, и 2 - влияющих на ее конфигурацию. При проведении расчетных экспериментов установлено, что любому набору исходных данных при выбранной принципиальной схеме газоснабжения потребителей соответствует одна и только одна оптимальная конфигурация сети;
- 3) разработке метода определения конфигурации межпоселковой газораспределительной сети на базе взвешенного метода наименьших квадратов. Изменен подход к определению удаления пункта потребления газа от проектируемой прямолинейной трассы, состоящий в минимизации расстояния к искомой прямой взамен общепринятого подхода минимизации суммы квадратов отклонений лишь по одной из координат. Получен критерий выбора схемы подключения пары абонентов к основной магистрали.
- 4) установлении характера степенной зависимости стоимости строительства газораспределительных сетей от их диаметра для стальных трубопроводов и

линейной зависимости для полиэтиленовых трубопроводов при рассмотрении всего ряда применяемых типоразмеров труб и получении математических моделей, описывающих эти зависимости;

5) обосновании ограниченности применения критерия материалоемкости при проведении технико-экономических расчетов.

**Практическая значимость** – разработанные в диссертации методы, а также методики и программы, могут быть использованы для решения задач по:

1) проектированию газораспределительных сетей с возможностью выбора оптимальной стратегии их развития и реконструкции, определения материала применяемых труб с целью оптимизации принятого в качестве целевого параметра (срок окупаемости, сметная стоимость, надежность, срок выполнения работ и т.д.).

2) проектированию газораспределительных сетей, которое благодаря последовательному рассмотрению выделенных в работе групп факторов существенно упрощается.

3) проектированию межпоселковых газораспределительных сетей с учетом приоритетности абонентов и нежелательности приближения к некоторым заданным объектам.

4) предварительному оцениванию сметной стоимости газораспределительной сети с использованием разработанных математических моделей с более высокой точностью по сравнению с существующими методами.

5) более точному учету привлекательности инвестиций в мероприятия по газораспределению на стадии проведения технико-экономических расчетов.

**Личный вклад автора:** результаты, выносимые автором на защиту, получены автором лично.

**Апробация работы:** основные теоретические положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на IX Международной научной конференции “Качество внутреннего воздуха и окружающей среды” в 17-22 мая 2011г., г. Кошалин, на X Международной научной конференции «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды» 13-20 мая 2012г., г. Будапешт, а также на четвертой международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции» МГСУ, г. Москва, 23 – 25 ноября 2011г.

**Внедрение результатов** произведено при проектировании проектным институтом ОАО «МосгазНИИпроект» объектов газораспределения Московской области, располагающихся в:

1. деревне Лужки Истринского р-на Московской обл.;
2. деревне Сосенки Дмитровского р-на Московской обл.;
3. деревне Мелихово Дмитровского р-на Московской обл.

***Достоверность результатов основана на:***

- корректности математической постановки решаемых задач, адекватно описывающих исследуемые процессы и объекты;
- использовании исходных данных, полученных из достоверных источников;
- положительных заключениях о практическом применении результатов диссертации при проектировании реальных газораспределительных сетей.

***Публикации:*** результаты диссертации изложены в 5 опубликованных работах, в том числе 2-х работах, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 3 – в трудах Всероссийских и Международных конференций.

***Структура и объем диссертации:*** диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация содержит: 120 страниц текста, 37 рисунков, 27 таблиц, список литературы из 68 наименований и 10 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во ***введении*** обосновывается актуальность темы, формулируется цель диссертационной работы и основные задачи исследования. Приведены основные положения, которые составляют научную новизну и практическую значимость работы.

В ***первой главе*** рассматриваются особенности функционирования газовых сетей, описывается исторически сложившаяся схема снабжения потребителей газом. Приводится общепринятая классификация газораспределительных систем и указываются области их применения. Отмечаются такие проблемы, как неудовлетворительная надежность и высокая аварийность существующих сетей газоснабжения, недостаточно высокий темп их развития, существенно отстающий от темпа роста потребления газа абонентами сети. Рассматриваются проблемы недостаточной проработки методов оценки эффективности и способов оптимального проектирования газораспределительных сетей, в том числе с применением ЭВМ. Приведен обзор и анализ литературы, посвященной проблематике функционирования и оптимизации газовых сетей.

В разное время развитием вопросов газоснабжения потребителей занимались: Ионин А.А., Жила В.А., Стаскевич Н. Л., Баясанов Д.Б., Берхман Е.И., Борисов С.Н., Даточный В.В., Гордюхин А.И., Иссерлин А.С., Равич М.Б., Левин А.М. и др.

Выполненный обзор–анализ исследований в области оптимального проектирования газораспределительных сетей позволяет сделать обобщение о том, что, несмотря на множество предлагаемых подходов, в настоящее время единой методики по определению оптимальных затрат на строительство и реконструкцию газораспределительных сетей не существует.

В разное время методами оптимизации сетей занимались: Пьер Ферма, Якоб Штейнер, Э. Торричелли, Б. Кавальери, Б. Кастелли, Т. Симпсон, Ф. Хейнен, Ж. Бертран, Войцех Ярник, Роберт Прим, Л.В. Канторович и др.

С развитием и использованием ЭВМ при решении оптимизационных задач стали применять различные методы математического программирования А.А. Чирас, А.Р. Ржаницын, Л.А. Расстригин, Д.И. Батищев, Е.Г. Николаев, Ю.М. Почтман, Г.В. Филатов, А.Е. Брайсон, Н.Н. Моисеев.

На кафедре железобетонных конструкций МИСИ им. В.В. Куйбышева д. т. н. Н. Н. Складневым были разработаны основы общей прикладной теории метода итерационного поиска. В дальнейшем указанную методику дорабатывали А.Г. Тамразян, П.Д. Деминов, Р.Г. Арутюнян, В.Н. Гаранин, М.К. Шеховцов, С.П. Сушков и др. Этими учеными выделены основные методы осуществления поиска: оптимизация целевой функции посредством многократного проведения цикла «Ц»-«F»-«I»-процедур с учетом системы ограничений, накладываемых на целевую функцию, варьируемые параметры и расчетные величины. «Ц»-процедура осуществляет переход поиска из области недопустимых решений (несоответствие решения условиям системы ограничений) в область допустимых решений задачи. «F»-процедура производит движение поиска к границе допустимых решений и останавливается вблизи нее, сокращая тем самым избыточный запас расчетных величин и минимизирует значение целевой функции. «I»-процедура организует отдаление процедуры поиска от границы допустимых решений.

В диссертации применены вышеуказанные методы оптимизации при проектировании газораспределительных сетей, доработанные с учетом специфики рассматриваемой отрасли и усовершенствована расчетная методика.

**Во второй главе** обосновано применение в качестве целевых функций следующих показателей:

- *срока окупаемости*, позволяющего корректно учесть в совокупности капитальные вложения, эксплуатационные расходы, стоимость газа и тариф на услуги по газоснабжению:

- *капитальных вложений* в систему газораспределения;
- *показателя надежности* газораспределительной сети.

Проанализирована структура сметной стоимости прокладки трубопроводов газораспределительных сетей, графическая интерпретация которой приведена на рисунке 1. Стоимость строительства газораспределительных сетей зависит от множества таких параметров, как: стоимость трубопровода, тип разрабатываемого грунта, ширина и глубина траншеи, материал трубопроводов и т.д. Наиболее ярко зависимость капитальных затрат на строительство сети прослеживается от ее диаметра.

Получены математические зависимости величины капитальных затрат на строительство газораспределительных сетей от их диаметра, позволяющие с удовлетворяющей степенью точности определять общие затраты на сооружение газопроводов различных типов и протяженностей:

- для полиэтиленовых газопроводов:  $K(d) = 0,97d + 0,22$  (1)

- для стальных газопроводов:  $K(d) = 2,32d^3 - 1,87d^2 + 1,59d + 0,22$  (2)

Графическая интерпретация приведенных зависимостей отображена на рис.2

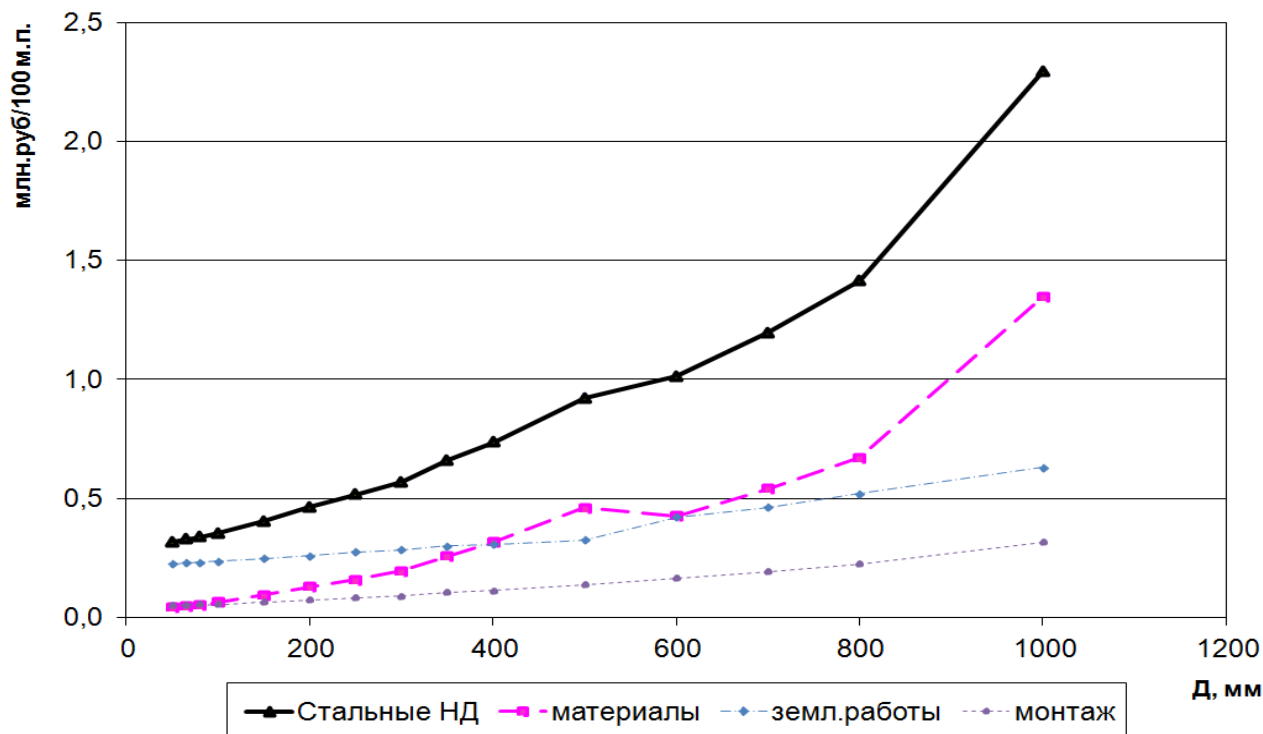


Рис. 1. Стоимость прокладки стальных газопроводов низкого давления для различных диаметров трубы.

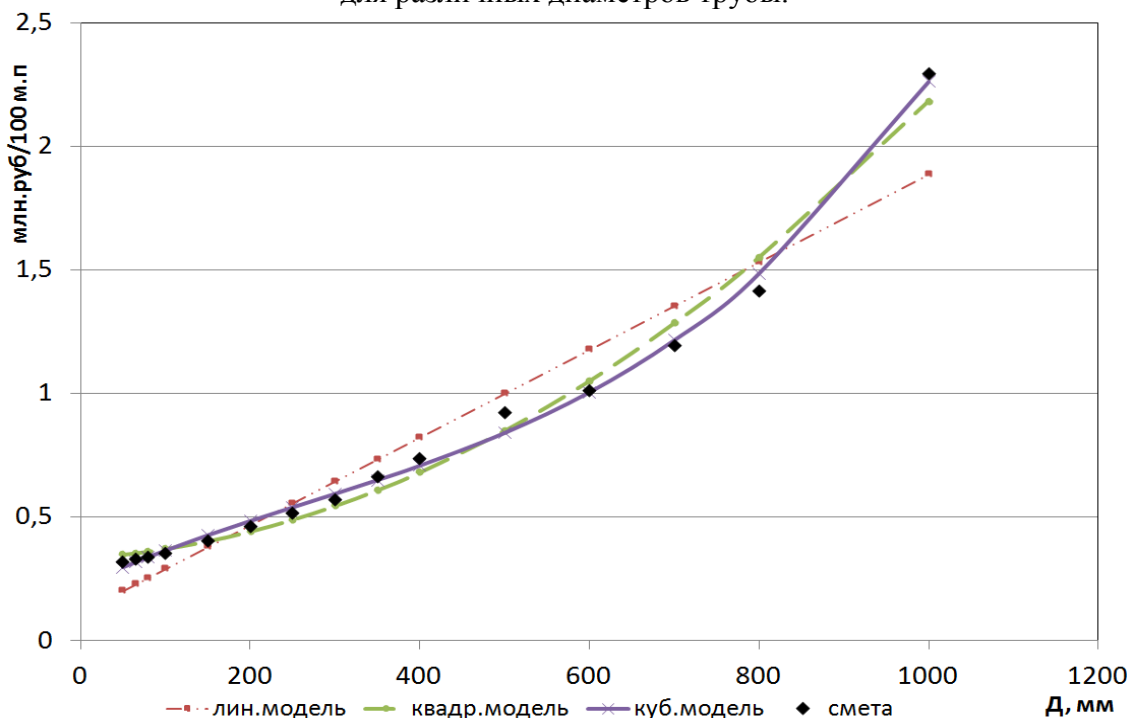


Рис. 2. Зависимость капитальных затрат на прокладку стальных газопроводов от их диаметра.

Согласно рекомендациям Ионина А.А, для определения капитальных затрат на строительство газораспределительных сетей, используется зависимость:

$$K_r = b * d + a \quad [\text{млн. руб.}] \quad (3)$$

где:  $b, a$  - коэффициенты стоимости [млн.руб./100 п.м.\*м] и [млн.руб./100 п.м] соответственно;  $d$  - диаметр трубы [м].



Путем аппроксимации реальных сметных данных для труб диаметром до 300 мм, получены современные значения коэффициентов:  $b = 1.023$  и  $a = 0.258$ .

С учетом структуры затрат на прокладку газопроводов, проанализировано отношение доли стоимости каждой группы затрат к общей сметной стоимости при различных диаметрах.

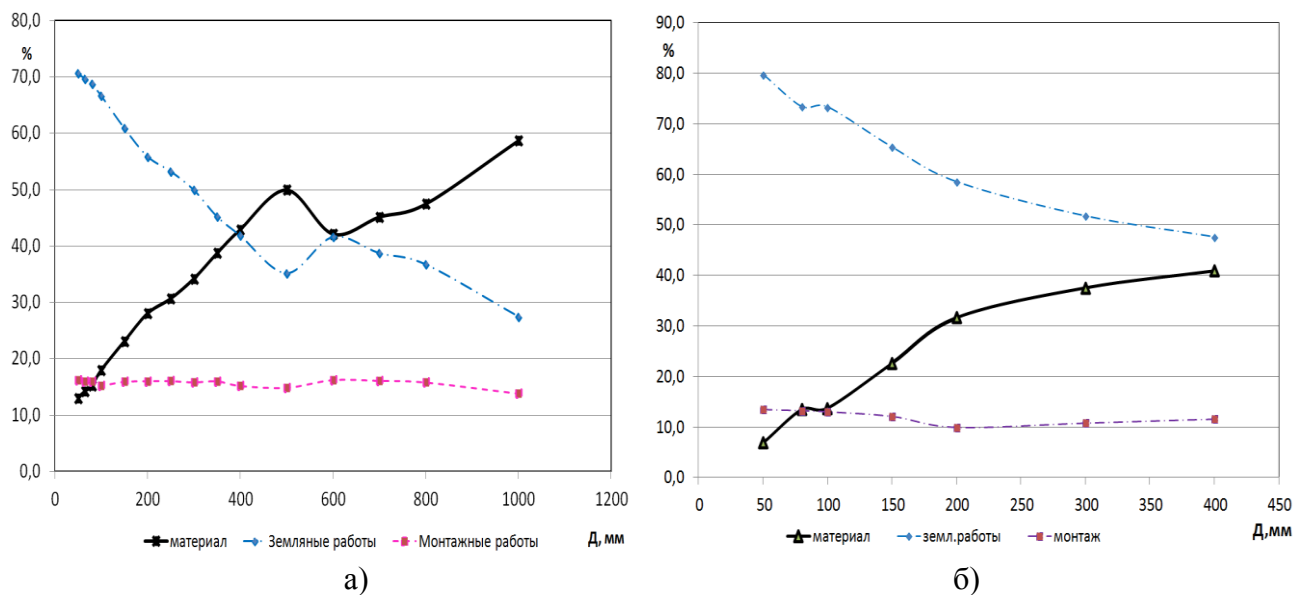


Рис.3. Доли затрат в общей стоимости прокладки газопровода при его различных диаметрах: а) стального; б) полиэтиленового

Из представленных графиков видно, что доля стоимости монтажных работ практически сохраняет постоянное значение для всех рассмотренных типоразмеров труб (около 15% для стальных труб и около 12% для полиэтиленовых), в то время как доля стоимости земляных работ имеет ярко выраженную зависимость от диаметра газопровода.

При рассмотрении доли затрат на материалы в общей сметной стоимости нами было установлено, что она существенно изменяется при переходе от использования трубы одного типоразмера к другому (см. рис. 3а и 3б).

Анализ рисунков 3а и 3б позволил сделать вывод, что использование материалоемкости (материальной характеристики) в качестве критерия экономичности проектируемой газораспределительной сети не приведет к достоверному результату. Материалоемкость, как критерий экономичности, может быть применима лишь для стальных газопроводов в интервале диаметров от 350 мм до 900 мм, в котором доля затрат на материалы не сильно изменяется (в пределах 40-50% от общей сметной стоимости). Для полиэтиленовых труб такой подход не применим вовсе, в силу существенной зависимости этой доли от диаметра используемой трубы.

Таким образом, при оценке экономической эффективности строительства газораспределительной сети необходимо учитывать сумму всех затрат на её сооружение ( $K$ ), как составной части параметра эффективности системы в целом ( $T_{ок}^o$ ).

Структура затрат каждого газоснабжающего предприятия зависит от текущего состояния вверенной ему газораспределительной системы, перспектив ее

развития, особенностей эксплуатации. Каждое предприятие, осуществляющее услуги газоснабжения, утверждает тарифы на газовое топливо по категориям потребителей, необходимые для успешного функционирования предприятия. Учитывая это обстоятельство, в работе для проведения технико-экономических расчетов, опираясь на исторические данные фактических эксплуатационных затрат, проанализирована структура эксплуатационных расходов на содержание газораспределительной системы и получена математическая зависимость для определения расчетных эксплуатационных расходов на содержание газораспределительной сети.

$$\text{Э} = 0,05K + 0,045 \frac{\sum L}{100}, \text{ [млн. руб./год]} \quad (4)$$

где:  $K$  - капитальные затраты на сеть [млн. руб.];

$\sum L$  – протяженность газопроводов [п.м.].

Приведены расчетные зависимости определения гидравлических потерь давления на трение, значения параметра надежности газораспределительной сети, используемые в диссертации для инженерных расчетов газораспределительных сетей.

**В третьей главе** приведена методика оптимизации конфигурации газораспределительных сетей на базе метода итерационного поиска.

Описаны применяемые методики построения оптимальных газораспределительных сетей. Примечательно, что они дают различные результаты не только экономических и надежностных показателей, но и геометрических характеристик сетей.

Представлены наиболее часто применяемые методики построения конфигурации оптимальной сети, возможности и результаты их применения.

Разработана методика для решения задачи формирования оптимальной конфигурации газораспределительной сети на базе математического аппарата поисковой оптимизации. Используемый математический аппарат способен учитывать все ограничения, налагаемые на систему газораспределения. Отличительной особенностью газораспределительной сети, как объекта оптимизации, является то, что увеличение диаметров газопроводов приводит к удорожанию газораспределительной сети, в то время как увеличение варьируемых параметров, обозначающих координаты характерных точек газораспределительной сети, может привести как к увеличению, так и к уменьшению стоимости строительства, что создает определенное затруднение для поиска оптимального решения.

Известно, что в условиях, когда целевая функция нелинейная и граница области допустимых решений выпуклая, точка оптимума единственная и лежит на границе допустимой области. Поэтому при разработке поисковой методики требовалось, чтобы обязательно учитывались как изменение целевой функции  $K$ , так и граничные условия, в качестве которых выступают минимальные пределы абсолютного давления газа в газопроводе на вводах к потребителям и минимально допустимая надежность сети.



Рис.4. Построение конфигурации сети методом наименьших квадратов

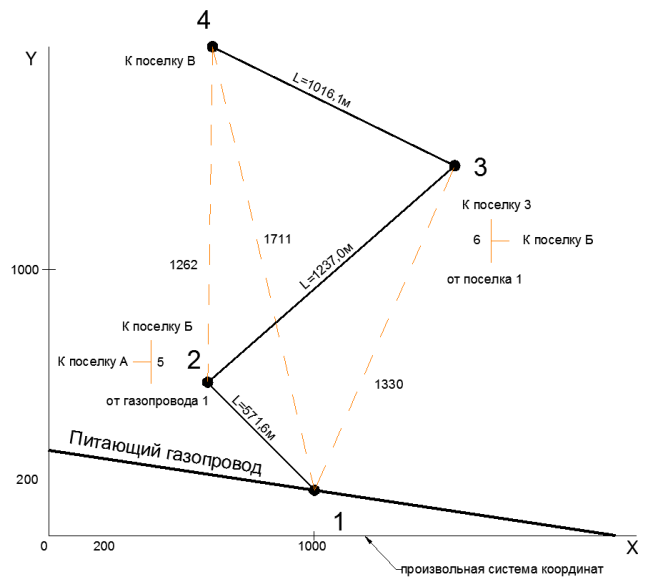


Рис.5. Построение конфигурации сети алгоритмом Прима

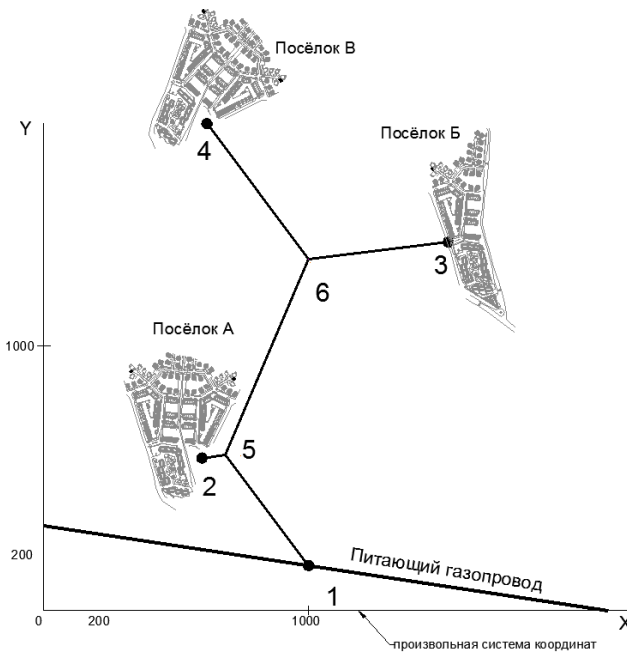


Рис.6. Построение конфигурации сети методом Штейнера

Начальная точка поиска может находиться как в области допустимых, так и недопустимых решений. Контроль над движением точки поиска производится с помощью промежуточных итераций. Промежуточной является итерация, при которой комбинация варьируемых параметров отличается от комбинации исходной итерации приращением только одного варьируемого параметра:

исходная итерация ( $r$ )  $a_{1, \epsilon^r} \quad a_{2, \epsilon^r} \quad a_{3, \epsilon^r} \quad \dots ; \quad a_{i, \epsilon^r}$

промежуточные итерации ( $r$ )

$$\left\{ \begin{array}{l} a'_{1, \epsilon^r} \quad a_{2, \epsilon^r} \quad a_{3, \epsilon^r} \quad \dots ; \quad a_{i, \epsilon^r} \\ a_{1, \epsilon^r} \quad a'_{2, \epsilon^r} \quad a_{3, \epsilon^r} \quad \dots ; \quad a_{i, \epsilon^r} \\ a_{1, \epsilon^r} \quad a_{2, \epsilon^r} \quad a_{3, \epsilon^r} \quad \dots ; \quad a'_{i, \epsilon^r} \end{array} \right. \quad (5)$$

итерация ( $r+1$ )  $a_{1, \epsilon^{r+1}} \quad a_{2, \epsilon^{r+1}} \quad a_{3, \epsilon^{r+1}} \quad \dots ; \quad a_{i, \epsilon^{r+1}}$ .

Значения варьируемых параметров в промежуточных итерациях определяются формулой:

$$a'_{i, r} = a_{i, r} \pm \Delta a_i \quad (6)$$

Движение от итерации  $\epsilon$  к итерации  $\epsilon + 1$  контролируется тремя показателями – значением целевой функции  $K_{\epsilon}$ , обобщенной невязки  $H_{\epsilon}$  и обобщенного избытка  $I_{\epsilon}$ .

Обобщенная невязка  $H_{\epsilon}$  и обобщенный избыток  $I_{\epsilon}$  образуются из условия ограничений вида:

$$\phi_j = \frac{g}{g} y - 1 \geq 0, \quad (7)$$

где  $j$  – порядковый номер конкретного ограничения:  $j = 1; 2; 3; \dots; n$ ;

$g$   $y$  – текущее значение расчетного параметра;

$g$  – предельное значение этого же параметра.

Невязкой и избытком по ограничению  $j$  называются соответственно величины  $H_j$  и  $u_j$ , которые определяются по условиям:

$$\begin{aligned} H_j = 0 \quad \text{и} \quad u_j = \phi_j, \quad \text{если} \quad \phi_j \geq 0; \\ H_j = \phi_j \quad \text{и} \quad u_j = 0, \quad \text{если} \quad \phi_j \leq 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Учитываемые ограничения составлены из условия минимума и имеют вид системы неравенств:

$$\left. \begin{aligned} \frac{P_i}{\{P_i\}} - 1 \geq 0 \\ \frac{R_{сист}}{\{R_{сист}\}} - 1 \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где:  $\{P_i\}$  – нормируемые величины минимального давления газа у ГРП и потребителей;

$\{R_{сист}\}$  – нормируемая величина минимально допустимой надежности системы газораспределения.

Совокупность  $H_j$  и  $u_j$  образуют нормы  $H_{\epsilon}$  и  $I_{\epsilon}$ , называемыми обобщенными невязкой и избытком:

$$H_{\epsilon} = \sqrt{\sum_{j=1}^n H_j^2} \quad \text{и} \quad I_{\epsilon} = \sqrt{\sum_{j=1}^n u_j^2} \quad (10)$$

Значение  $H_{\epsilon} > 0$  означает, что точка поиска находится в недопустимой зоне, а значение  $H_{\epsilon} = 0$  – что точка поиска находится в допустимой зоне.

Поэтому движение поиска должно осуществляться таким образом, чтобы обобщенная невязка  $H_{\epsilon}$  от итерации к итерации уменьшалась и, в конце концов, приравнивалась нулю. Такое движение называется «Ц» процедурой.

При соблюдении условия  $H_{i, \zeta} = 0$ , значение  $I_{i, \zeta} > 0$  означает, что положение поиска находится в глубине допустимых решений, а значение  $I_{i, \zeta} = 0$  – что положение поиска находится на границе допустимых решений.

Движение, при котором значение обобщенного избытка от итерации к итерации уменьшается и приравнивается нулю, называется «F» процедурой.

С изменением варьируемого параметра  $a_{i, \zeta}$  в значение  $a'_{i, \zeta}$  величины целевой функции  $K_{i, \zeta}$ , обобщенной невязки  $H_{i, \zeta}$  и обобщенного избытка получают приращения  $\Delta K_i$ ,  $\Delta H_i$  и  $\Delta I_i$

$$\Delta K_i = K_{i, \zeta'} - K_{i, \zeta} \quad \Delta H_i = H_{i, \zeta'} - H_{i, \zeta} \quad \text{и} \quad \Delta I_i = I_{i, \zeta'} - I_{i, \zeta} \quad (11)$$

где  $K_{i, \zeta}$ ,  $H_{i, \zeta}$  и  $I_{i, \zeta}$  - значения соответственно целевой функции, обобщенной невязки и обобщенного избытка при промежуточной итерации для  $i$ -го параметра.

Приращения  $\Delta H_i$  и  $\Delta K_i$  могут принимать любые значения и проявляться в следующих сочетаниях:

- |  |  |  |
|--|--|--|
| 1. $\Delta H_i < 0$ и $\Delta K_i < 0$ | 4. $\Delta H_i = 0$ и $\Delta K_i < 0$ | 7. $\Delta H_i > 0$ и $\Delta K_i < 0$ |
| 2. $\Delta H_i < 0$ и $\Delta K_i = 0$ | 5. $\Delta H_i = 0$ и $\Delta K_i = 0$ | 8. $\Delta H_i > 0$ и $\Delta K_i = 0$ |
| 3. $\Delta H_i < 0$ и $\Delta K_i > 0$ | 6. $\Delta H_i = 0$ и $\Delta K_i > 0$ | 9. $\Delta H_i > 0$ и $\Delta K_i > 0$ |

Значение  $\Delta H_i < 0$  означает, что точка поиска движется вглубь недопустимой области. Поэтому, при движении по «Ц» процедуре, направления, образующиеся сочетаниями 1÷3, должны игнорироваться.

Значение  $\Delta H_i = 0$  означает, что положение поиска не изменилось. Но если при этом значение целевой функции снижается ( $\Delta K_i < 0$ ), то такое направление (4-ое сочетание) может считаться эффективным для поиска оптимума. Другие направления (5-ое и 6-ое сочетания) таковыми являться не могут, так как целевая функция либо не меняется ( $\Delta K_i = 0$ ), либо приводит к удорожанию проекта ( $\Delta K_i > 0$ ).

Значение  $\Delta H_i > 0$  свидетельствует о том, что точка поиска движется в сторону границы допустимых решений. Поэтому сочетания 7÷9 будут считаться предпочтительными направлениями для поиска оптимума.

Таким образом, при движении по «Ц» процедуре порядок условий по приоритету проверки будет:

- |   |   |
|---|---|
| условие №1. $\Delta H_i > 0$ и $\Delta K_i < 0$ | условие №3. $\Delta H_i > 0$ и $\Delta K_i > 0$ |
| условие №2. $\Delta H_i > 0$ и $\Delta K_i = 0$ | условие №4. $\Delta H_i = 0$ и $\Delta K_i < 0$ |

В случае, если на переходе от итерации  $\zeta$  к итерации  $\zeta+1$  условие №1 выполняется хотя бы на одной промежуточной итерации, то остальные условия не проверяются, а движение поиска продолжается по этому направлению. Если

условие №1 проявляется в нескольких промежуточных итерациях, то выбор направления движения производится из условия  $C_{1i} = \max$ , где числовое значение процедуры поиска  $C_{1i}$  определяется формулой:

$$C_{1i} = \Delta H_i \cdot |\Delta K_i|. \quad (14)$$

Если условие №1 не выполняется ни в одной из промежуточных итераций, то проверяется второе по приоритету условие. Выполнение условия №2 хотя бы на одной промежуточной итерации означает, что проверка остальных условий не требуется, а выбор направления движения должен производиться из условия  $C_{2i} = \max$ , где:

$$C_{2i} = \Delta H_i. \quad (15)$$

Далее таким же образом проверяются по очереди условия №3 и №4, а выбор направления движения производится соответственно из условий  $C_{3i} = \max$  и  $C_{4i} = \max$  где:

$$C_{3i} = \frac{\Delta H_i}{\Delta K_i}; \quad C_{4i} = |\Delta K_i|. \quad (16)$$

При движении по «F» процедуре выбор направления движения осуществляется из условия №4. В случае, если в промежуточных итерациях оно выполняется, то движение поиска продолжается по этому направлению из условия  $F_i = \max$ , где:

$$F_i = \frac{\Delta K_i}{\Delta H_i}. \quad (17)$$

Если условие №4 не выполняется ни в одной из промежуточных итераций, т.е.  $F_i = 0$ , то это означает, что точка поиска находится на минимальном расстоянии от границы допустимых решений.

Таким образом, «Ц» и «F» процедуры обеспечивают переход точки поиска из недопустимой области на границу допустимых решений. Однако абсолютно точного попадания в окрестность точки  $K_{opt}$  эти процедуры не гарантируют. Поэтому производится отталкивание по «I» процедуре вглубь недопустимой/допустимой области и оттуда снова делается движение в сторону границы по «Ц» и «F» процедурам.

Порядок условий по приоритету проверки при «I» процедуре будет:

$$\left. \begin{array}{l} \text{условие 1.} \quad \Delta H_i < 0 \text{ и } \Delta K_i < 0 \\ \text{условие 2.} \quad \Delta H_i < 0 \text{ и } \Delta K_i = 0 \\ \text{условие 3.} \quad \Delta H_i < 0 \text{ и } \Delta K_i > 0 \end{array} \right\} \quad (18)$$

В случае, если в промежуточных итерациях условие №1 выполняется, то остальные условия не проверяются, а движение поиска продолжается по этому направлению из условия  $I_{1i} = \max$ , где:

$$I_{1i} = \frac{\Delta H_i}{\Delta K_i}. \quad (19)$$

Если условие №1 не выполняется ни в одной из промежуточных итераций, то подобным образом проверяются по очереди условия №2 и №3, а выбор направления движения производится соответственно из условий  $I_{2i} = \max$  и  $I_{3i} = \max$  где:

$$I_{2i} = |\Delta H_i|, \quad I_{3i} = \frac{|\Delta H_i|}{\Delta K_i}. \quad (20)$$

Таким образом, последовательность «Ц»-«F»-«I»-«Ц»... процедур, является пилообразным движением, которое обязательно притягивается к точке оптимума и останавливается при многократном повторении значений варьируемых параметров и целевой функции. Графическая интерпретация процесса поиска оптимального решения приведена на рисунке 7.



Рис. 7. Схема поиска оптимума по процедурам «Ц»-«F»-«I»

Отыскание положения точки оптимума производится с помощью ее специфического свойства: в случае если точка поиска попадает в оптимальную точку, после выполнения очередного цикла «I»-«Ц»-«F» процедур поиск обязательно возвращается к ней.

На рисунке 8 продемонстрирован результат применения вышеописанной методики поисковой оптимизации для определения конфигурации сети с минимально возможным сроком окупаемости и максимальной надежностью для заданной принципиальной схемы.

Разработана также методика, позволяющая определить местоположение межпоселковых газопроводов и поселковых ответвлений, на основе модифици-

рованного взвешенного метода наименьших квадратов (ВМНК). Результат применения указанной методики показан на рисунке 9.

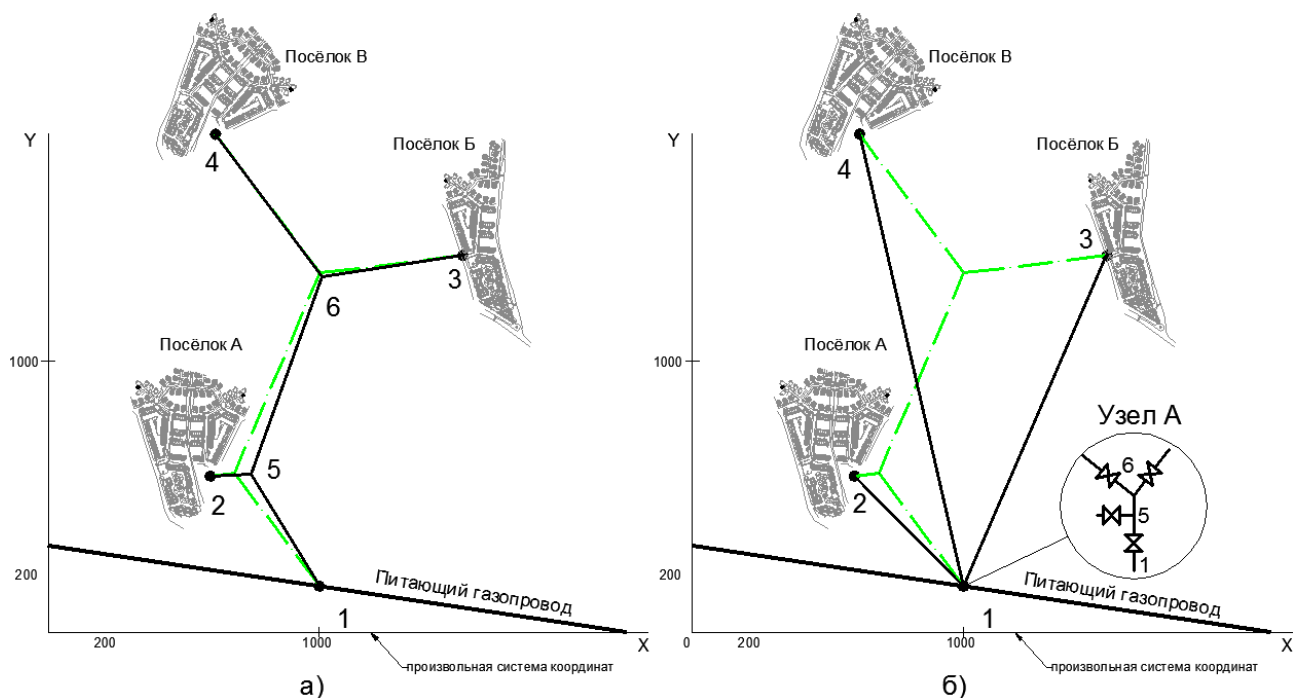


Рис.8.Результат оптимизации конфигурации газораспределительной сети: а) по параметру «срок окупаемости»; б) по параметру «надежность». Штрихпунктирная линия – построение кратчайшей сети методом Штейнера.

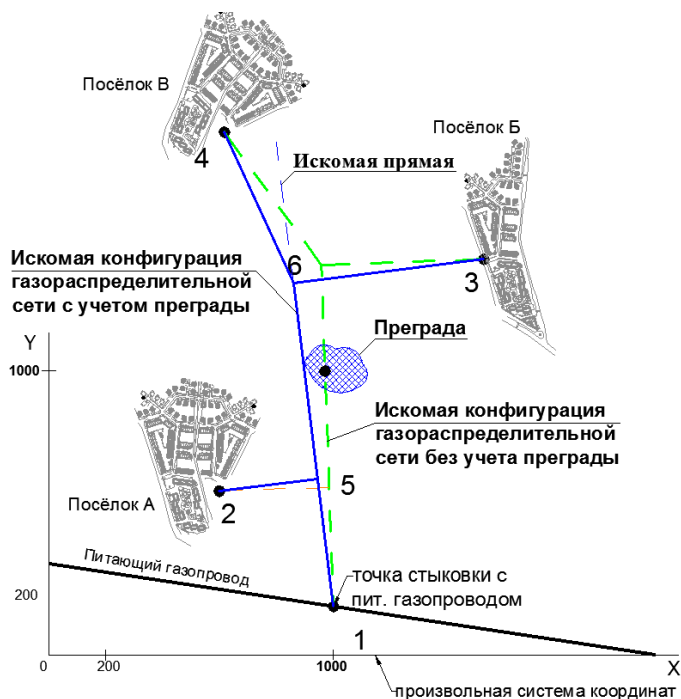


Рис 9. Конфигурация газораспределительной сети, полученная с использованием модифицированного ВМНК

Указанная методика позволяет не только проектировать газораспределительную сеть с «тяготением» к некоторой точке, но и позволяет избегать нежелательного пересечения труднопроходимых препятствий путем введения отрицательного весового коэффициента для этих препятствий.

Определены коэффициенты искомой линии газопровода подключения к питающей магистрали

$$\left. \begin{aligned}
 y &= Ax + B: \\
 A &= -\frac{b}{a} \\
 B &= \frac{\sum p_i y_i - A \sum p_i x_i}{\sum p_i}
 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

где:  $a = \sum p_i \sum p_i x_i^2 - (\sum p_i x_i)^2$ ;  $b = \sum p_i x_i * \sum p_i y_i - \sum p_i \sum p_i x_i y_i$



В четвертой главе на примерах решений задач показано, что предлагаемая методика поисковой оптимизации позволяет:

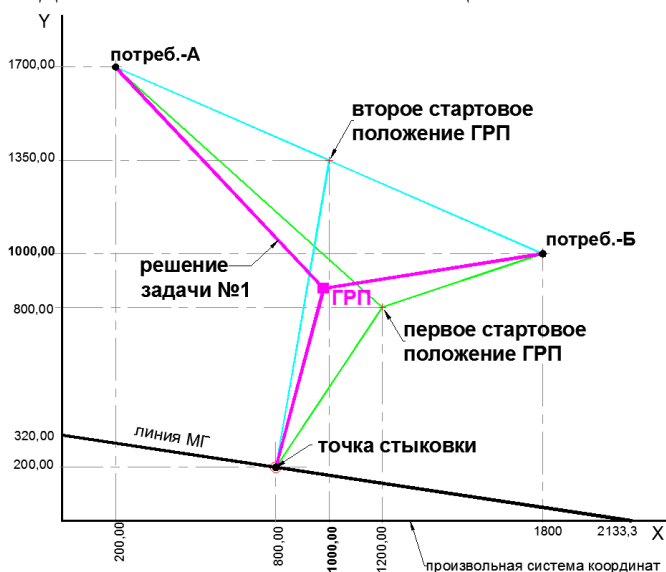


Рис.10. Задача 1

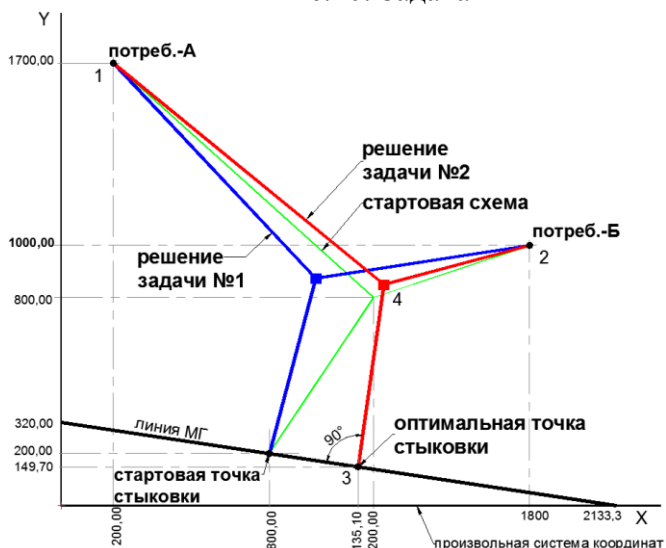


Рис.11. Задача 2

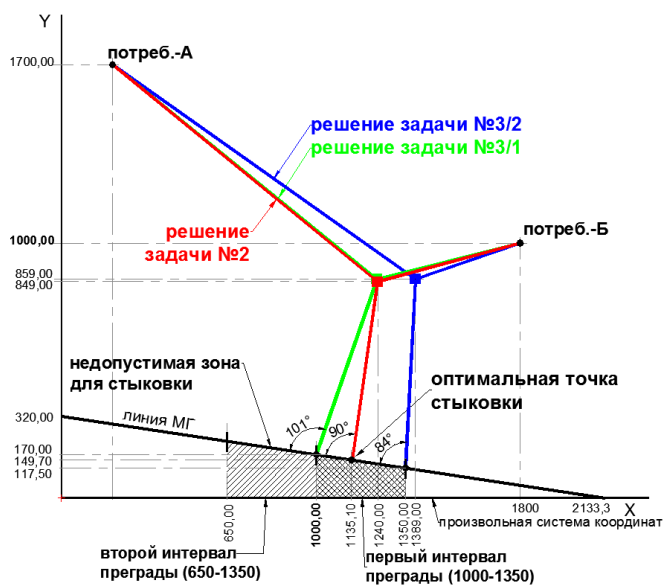


Рис.12. Задача 3

1. Находить оптимальную конфигурацию газораспределительной сети по заданному целевому параметру с учетом всех ограничительных условий, начиная поиск из любого стартового положения (рис.10);

2. Принимать в качестве варьируемых параметров координаты точек подключения к сети (рис.11) и к абонентам;

3. Производить оптимизацию газораспределительной сети с учетом невозможности стыковки с газопроводом в заданном геометрическом интервале (рис.12).

Проведенные в диссертации исследования показали, что оптимизация газораспределительных сетей является многофакторной задачей, и её решение путем минимизации только общей протяженности сети не может являться оптимальным. Наиболее эффективные результаты достигаются в случае, если в качестве критерия оптимальности выступает срок окупаемости инвестиций в мероприятия по газораспределению. При сравнении трассировок, полученных предложенной поисковой методикой и построением сети наименьшей длины (дерево Штейнера), выясняется, что разница как в стоимостном, так и в геометрическом плане, невелика. Это, с одной стороны, свидетельствует о состоятельности

предложенной методики, с другой стороны, имеющаяся ценовая разница свидетельствует в пользу достоинства предложенной методики.

Задача оптимизации газораспределительной сети предполагает наличие

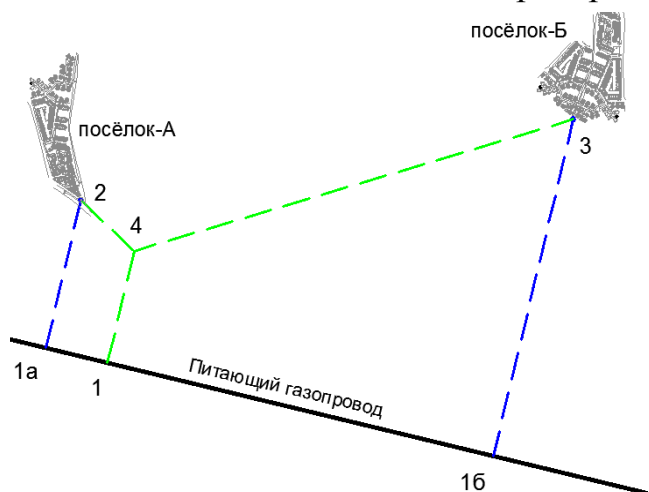


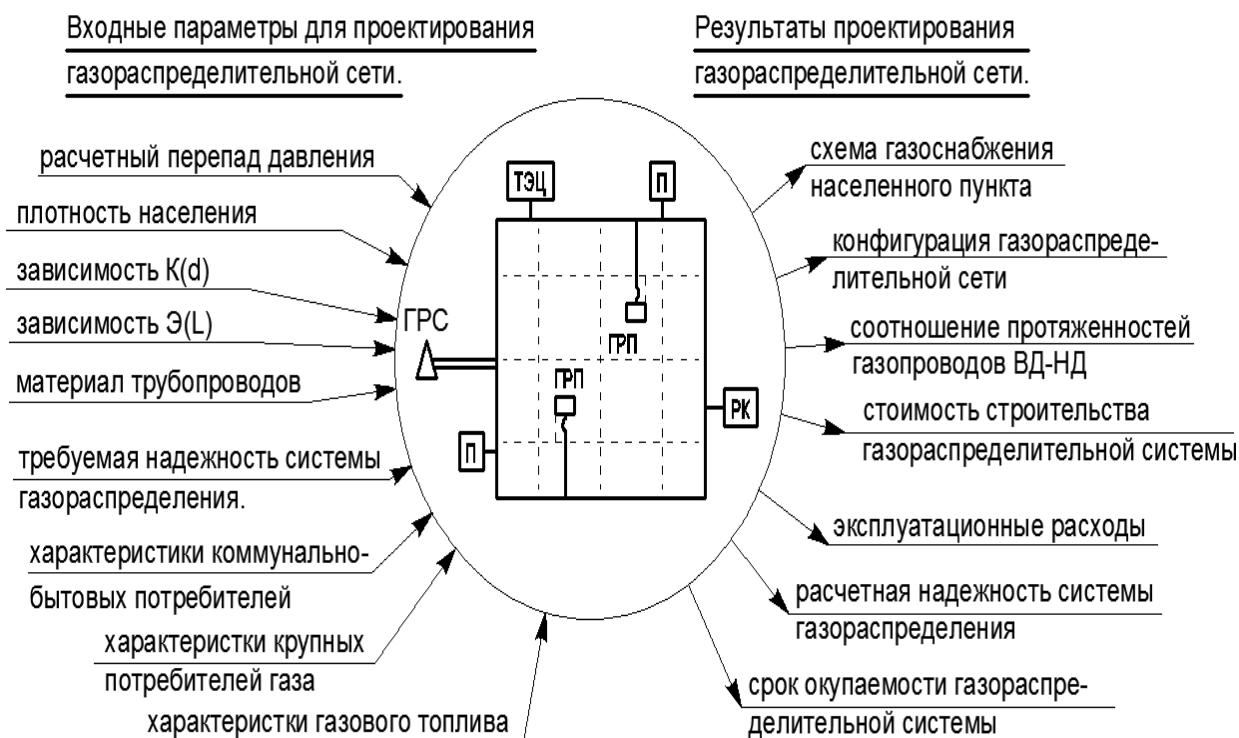
Рис.13. Выбор схемы подключения абонентов

заданной схемы сети, которую предстоит улучшить в соответствии с выбранными критериями.

Выбор схемы подключения пары абонентов к питающей магистрали предложено определять неравенством:  $L < \frac{H_1 + H_2}{\sqrt{3}}$ . (22)

где:  $L$ - расстояние между подключаемыми поселками в проекции на питающую магистраль,  $H_1$  и  $H_2$  – расстояние от поселков до питающей магистрали.

**В пятой главе** показано, что оптимальная трассировка газопроводов обуславливается не только значениями принятых в задаче варьируемых параметров. Она в равной степени зависит от параметров, которые в поставленной задаче принимались в качестве исходных. Очень важно на стадии проектирования правильно и в полном объёме учесть все факторы, влияющие на выбор системы газоснабжения и её конфигурацию. Для наглядности изобразим их на упрощенной схеме газоснабжения города (рис.14).



$\Pi$  – крупные потребители газа;  $РК$  – районная котельная.

Рис. 14. Исходные параметры и результаты проектирования системы газоснабжения

Приведенные на схеме факторы можно условно разбить на 2 группы:

*влияющие на выбор схемы газоснабжения:*

- планировка поселений;
- плотность населения;
- структура газопотребления;
- объемы потребления газа крупными потребителями;
- объем газопотребления бытовыми потребителями;
- требуемая надежность системы газораспределения.

*влияющие на конфигурацию сети:*

- местоположение и мощность магистральных газопроводов, ГРС, ГНС и др.;
- условие подключения системы газораспределения к потребителям;
- расчетный перепад давления;
- зависимость капитальных затрат на строительство газораспределительной сети от её диаметра;
- зависимость эксплуатационных затрат от протяженности сети;
- применяемый материал трубопроводов.

Анализ практики проектирования газораспределительных сетей показывает, что количество потребляемого газа рассматривается только с целью определения диаметров ветвей трубопроводов, а при формировании геометрии сети количество потребляемого газа не учитывается.

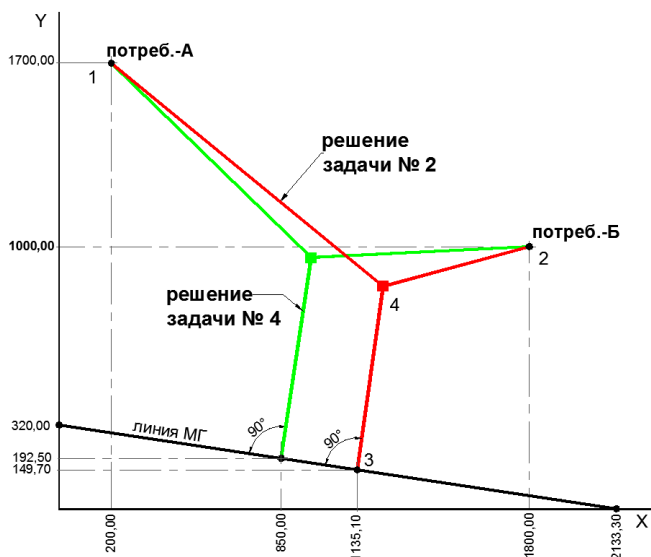


Рис. 15. Задача 4

В данной работе на проведенных расчетных экспериментах показано, что в оптимизационных задачах величина расхода газа потребителями сказывается не только на экономических параметрах проекта, но влияет и на формирование конфигурации проектируемых газопроводов (рис. 15).

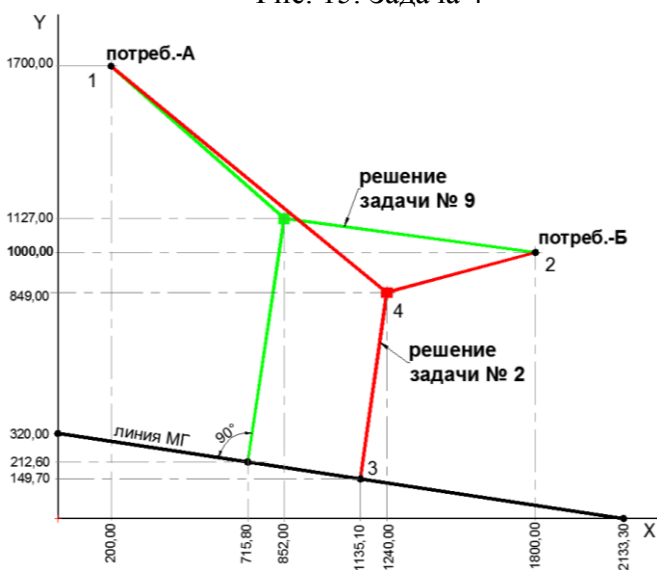


Рис. 16. Задача 9

Выявлено также, что в зависимости от выбора материала труб газопроводов геометрическая схема проектируемой сети газораспределения может принимать различные очертания (рис.16).

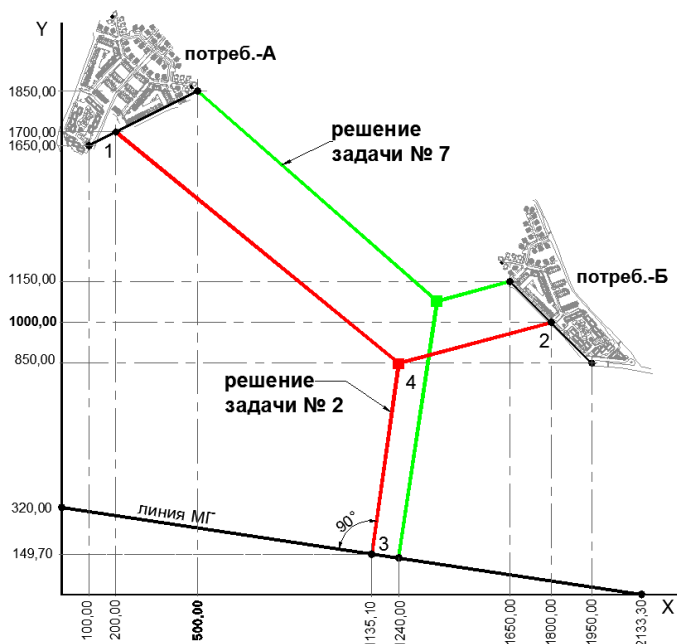


Рис. 17. Задача 7

Продемонстрировано, что в оптимизационных задачах условие подключения проектируемой наружной сети к внутренним сетям потребителей является одним из определяющих факторов для формирования конфигурации наружной сети газоснабжения (рис.17).

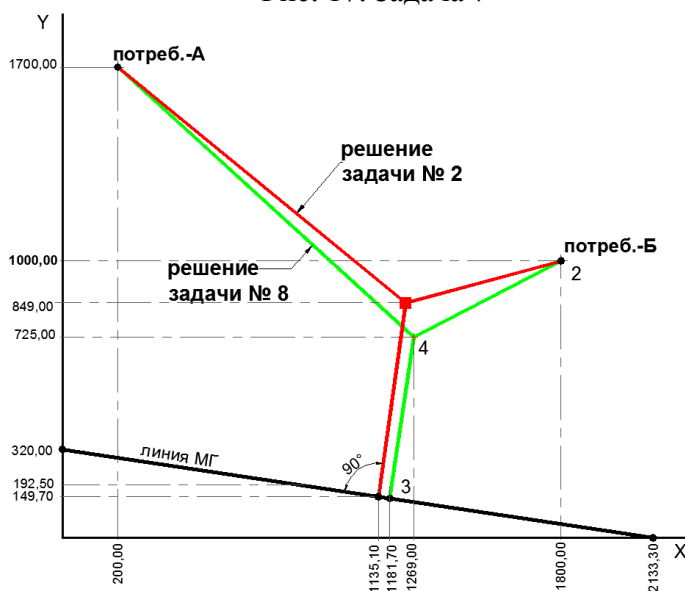


Рис. 18. Задача 8

Установлено, что перевод газопровода с низкого на среднее давление не только сокращает затраты на прокладку газопроводов, но и обуславливает новую оптимальную схему трассировки проектируемого газопровода (рис.18).

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В рамках исследований, изложенных в диссертации, достигнуты следующие наиболее важные результаты:

- 1) Получены математические зависимости для определения величины капитальных затрат на строительство газораспределительных сетей, позволяющие с удовлетворяющей степенью точности определять общие затраты на сооружение газопроводов различных типов и протяженностей. Продемонстрировано влияние фактора времени на ценообразование при сооружении и последующей эксплуатации газораспределительных сетей.
- 2) Получена методика итерационного поиска, позволяющая получать решения задачи конфигурирования газораспределительной сети, оптимальной по выбранному в качестве целевой функции параметру с учетом всех ограничительных условий. Предлагаемая методика полезна не только с точки зрения прикладного применения, но и как инструмент для выявления факторов, влияющих на оптимальную трассировку газораспределительных сетей.
- 3) На примерах решений представленных задач показано, что предлагаемая методика позволяет найти оптимальную конфигурацию сети газораспределения.
- 4) Продемонстрировано, что каждому набору исходных данных соответствует единственная оптимальная схема газораспределительной сети.
- 5) Установлено, что в оптимизационных задачах значения исходных параметров при проектировании газораспределительных сетей имеют прямое влияние не только на технико-экономические параметры проекта, но и на формирование конфигурации проектируемых газопроводов.
- 6) Получен критерий выбора схемы подключения пары абонентов к основной магистрали.
- 7) Усовершенствована методика, позволяющая определять местоположение межпоселковых газопроводов и поселковых ответвлений от них, представляющая собой модифицированный взвешенный метод наименьших квадратов.
- 8) Для решения поставленных задач в диссертации разработана соответствующая совокупность вычислительных алгоритмов. Она включает:
  - вычислительные алгоритмы расчета технико-экономических показателей проектируемой сети;
  - вычислительные алгоритмы оптимизации проектируемой сети по методике поисковой оптимизации;
  - вычислительный алгоритм построения конфигурации газораспределительной сети с использованием метода взвешенных наименьших квадратов.
- 9) Результаты расчетов на ПЭВМ показали высокую эффективность разработанных методов и алгоритмов. Комплексы программ, представляющих интерес для широкого круга пользователей, используются в учебном процессе на кафедре «Теплотехники и теплогазоснабжения» МГСУ.

*Основное содержание диссертации представлено в следующих работах:*

1. **Жила В.А., Клочко А.К.** «Анализ и структурирование газифицируемых районов, создание автоматизированной системы распределения ГРП в населенном пункте» - Вестник МГСУ, 7/2011, с. 494-497.
2. **Табунщиков Ю.А., Коптев Д.В., Жила В.А., Клочко А.К., Соловьева Е.Б.** «Выбор эффективных систем газораспределения» - Вестник МГСУ, 8/2011, с. 222-229.
3. **Жила В.А., Клочко А.К., Васильева О.В.** «Выбор эффективных систем газоснабжения» - Качество внутреннего воздуха и окружающей среды: материалы IX международной научной конференции, 17 – 22 мая 2011г., г. Кошалин, с.160-166.
4. **Клочко А.К.** «Методика поисковой оптимизации для решения задач по рациональной трассировке газораспределительной сети» - Качество внутреннего воздуха и окружающей среды: материалы X международной научной конференции, 13 - 20 мая 2012г., г. Будапешт, с.171-177.
5. **Клочко А.К., Жила В.А.** «Сравнительный анализ трассировок газораспределительной системы, построенной при помощи дерева Штейнера и методом поисковой оптимизации» - Качество внутреннего воздуха и окружающей среды: материалы X международной научной конференции, 13 - 20 мая 2012г., г. Будапешт, с.187-191.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю кандидату технических наук, профессору Жиле В.А. за постоянное внимание к работе, ценные советы и обсуждение результатов, а также доктору технических наук профессору Хаванову П.А. и кандидату технических наук Арутюняну Р.Г. за полезные обсуждения и помощь в работе.